# Gestion patrimoniale des infrastructures de la ratp : développement d'un processus d'aide à la décision pour optimiser la stratégie de maintenance

Angel Paterna Hidalgo

**Thèse de doctorat d'Université Paris-Est**

**Génie Urbain**

**Angel PATERNA HIDALGO**

# GESTION PATRIMONIALE DES INFRASTRUCTURES DE LA RATP : DEVELOPPEMENT D'UN PROCESSUS D'AIDE A LA DECISION POUR OPTIMISER LA STRATEGIE DE MAINTENANCE

***Thèse dirigée par Youssef DIAB***

Soutenue le 13 novembre 2015

**Jury :**

| | | |
|---|---|---|
| Corinne CURT | Ingénieur Recherche – HDR, IRSTEA | Rapporteur |
| Pierre BREUL | Professeur Université Blaise Pascal – HDR | Rapporteur |
| Jean LATERRASSE | Professeur Emérite Université Paris Est Marne la Vallée | Président du jury |
| Youssef DIAB | Professeur Université Paris Est Marne la Vallée | Directeur de thèse |
| Damien SERRE | Professeur Université Avignon | Co-directeur de thèse |
| Marc VUILLET | Docteur – EIVP | Examinateur |
| André PENY | Architecte chercheur – RATP | Examinateur |
| Olivier AKNIN | Ingénieur Responsable Maintenance – RATP | Examinateur |

*La simplicité est la gentillesse des sages*

*María Zambrano « Pensée et poésie dans la vie espagnole »*

# *Remerciements*

Damien Serre et Jacques Brochet, c'est grâce à votre confiance aveugle en moi que j'ai pu commencer cette thèse. Plutôt que par des mots, j'ai toujours essayé de vous en remercier par un bon travail.

Un travail qui est le résultat des efforts de plusieurs personnes. Les contributions des stagiaires Bernat Ferrer, Evanthia Leventi, Quentin Risak et Soufiane Miftah ont été d'une utilité essentielle ; surtout grâce à l'énergie des jeunes ingénieurs que vous m'avez transmise pendant nos collaborations. Marc Vuillet et Youssef Diab, co-encadrant et directeur de thèse, merci de m'avoir guidé au long d'un chemin qui a été, par moments, sinueux comme un point d'interrogation.

Je remercie avec la même intensité toute l'équipe de la RATP qui a participé à cette recherche. Carlos Duarte Barrio et Olivier Aknin, vous vous êtes appropriés efficacement ce projet et m'avez transmis les connaissances nécessaires pour m'initier à la gestion du patrimoine de la RATP. La patience et l'expérience de Jean-François Douroux, Patrick Goirand, Alain Desbordes et François Mirouze ont été indispensables pour faire aboutir cette thèse et pour me faire découvrir un patrimoine unique et historique comme celui de la RATP. Merci, François, d'avoir suivi cette aventure dès le début et d'avoir toujours proposé des applications de notre recherche qui, j'espère, bientôt verront le jour.

Monsieur Jean Laterrasse, merci pour l'honneur que vous m'avez fait en présidant le jury. Madame Corinne Curt et Monsieur Pierre Breul, ma sincère reconnaissance pour avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse. Monsieur André Peny, toute ma gratitude pour faire partie du jury en apportant votre vaste connaissance de la RATP. Merci pour vos jugements, vos commentaires constructifs et l'intérêt que vous avez porté à mon travail.

Etienne Burdet, tu m'as appris que c'est de problème en problème que la science fait son miel. Et quand ma motivation et mon courage ont pali, ça a été le plaisir de voir les camarades et amis qui m'a aidé à ne pas faiblir. Charlotte, Alberto, Martin, Valère, Nicolas, Omar, Paco, William ! merci d'avoir créé un coin pour les sourires et les rêveries inspirées par la muse imprévue de mes pieds nus.

Encore une fois, MERCI DAMIEN SERRE pour ton engagement constant et toute ton aide. Ta leçon exemplaire est bien apprise.

Chers collaborateurs, cher lecteur, sachez-le bien : ces remerciements sont sincères et bien fondés. Mais polis et fragiles comme le verre car, je vous préviens, j'éclaterais en colère si vous osez dire un seul mot à ma famille.

Eux, fiers de moi, ils croient toujours que j'écrivais des jolis vers pour Margherita.

# Résumé

La RATP est l'exploitant et le gestionnaire du réseau de transport métropolitain de la ville de Paris et de sa banlieue proche. Actuellement, avec près de 10 millions de voyageurs par jour, il est l'un des réseaux les plus chargés au monde. Dans ce contexte de fortes exigences d'exploitation, les gestionnaires de la RATP doivent assurer la sécurité, la capacité de service et la pérennité d'un patrimoine d'infrastructures hétérogène et ancien. Les ressources disponibles sont, par nature, limitées et, dans ces circonstances, deux tâches deviennent essentielles : justifier les budgets nécessaires et optimiser les programmations de travaux de maintenance.

Le système de maintenance actuel est fondé sur des inspections visuelles permettant de relever les désordres affectant l'état structurel des ouvrages. Ensuite, les gestionnaires doivent choisir et prioriser les ouvrages à entretenir en fonction de ces résultats et des différentes contraintes qui interviennent dans la gestion du patrimoine. Ce processus décisionnel est fondé sur l'expertise des gestionnaires et n'est pas formalisé. Ainsi, l'objectif de cette thèse consiste à développer un outil d'aide à la gestion patrimoniale qui réduise la variabilité intrinsèque des actions de surveillance visuelle et le manque de transparence dans les décisions.

Pour fournir aux gestionnaires de la RATP un tel outil, ma recherche s'appuie sur les étapes suivantes :

- la modélisation fonctionnelle des mécanismes de dégradation des ouvrages bâtie à partir des outils de la Sûreté de Fonctionnement. L'Analyse Fonctionnelle (AF), l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) et des graphes causaux sont appliqués pour connaître comment les infrastructures fonctionnent, se dégradent et interagissent avec leur environnement.
- la construction d'un outil d'aide à la gestion fondé sur les méthodes multicritère d'aide à la décision. Dans un premier temps, nous construisons une famille cohérente de critères qui formalise les différents aspects techniques et socio-économiques qui interviennent dans le processus décisionnel de la RATP (méthode d'agrégation à base de règles). Ensuite, à partir des méthodes ELECTRE, nous développons un outil multicritère d'aide à la décision permettant d'optimiser la gestion du patrimoine de la RATP.

Enfin, nous présentons une application de l'outil développé sur la ligne 4 du métro de Paris et les perspectives ouvertes par nos recherches, la principale étant le développement opérationnel de cet outil dans le cadre de la gestion du patrimoine d'infrastructures de la RATP.

***Mots clés*** : gestion patrimoniale, Sûreté de Fonctionnement, aide à la décision multicritère, infrastructures de transport ferroviaire.

# Abstract

The RATP is the operator and asset manager of the public railway transport of Paris and the next suburbs. Nowadays, with more than 10 million trips per day, this transport network is one of the most crowded in the world. In this context of high service requirements, the RATP asset managers must assure the structural integrity, the quality of service and the sustainability of an aging and heterogeneous asset. However, available budgets are, by nature, limited and, in this context, two tasks become essential: to justify budget requirements and to optimize the programming of maintenance actions.

The current asset strategy is based on visual inspections to detect degradation symptoms that concern the structural integrity of the structure. Depending on these results, managers must select and prioritize the maintenance actions taking into account the constraints involved in asset management. This decision-making process is based on the expert knowledge and is not formalized. In this context, the purpose of this thesis is to develop a multicritera decision support tool which reduces the inherent variability degree of visual inspections and the lack of transparency in the decision-making process.

In order to provide RATP's managers a decision support tool, this research is based on the next stages:

- The development of a functional model of degradation mechanisms by the application of the operational safety methods. The Functional Analyse (FA), the Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) and the casual graphs are applied to know how infrastructures function, degrade and interact with the environment.
- The construction of a decision support tool based on multicriteria methods. The first stage is the construction of a lot of criteria formalizing the technical, economic and social aspects involved in the RATP's asset management (rule-based assignment model). The second stage is the application of ELECTRE methods to develop a multicriteria decision support tool which optimizes the management of the RATP's asset.

This tool is tested on the line 4 of the Paris metro in order to study development prospects. The main prospect is the operational development of this tool in the context of the management of the RATP's asset.

***Keywords:*** asset management, operational safety methods, multicriteria decision support, railway infrastructures.

# Table des matières

# Introduction

La RATP (Régie Autonome des Transports Parisiens) est l'exploitant et le gestionnaire du réseau de transport métropolitain de la ville de Paris et de sa banlieue proche. Ce réseau ferroviaire, dès sa première planification à la fin du XIX$^{ème}$ siècle, a été conçu et développé jusqu'à nos jours comme une réponse économique et sociale de la ville de Paris. Actuellement, avec près de 10 millions de voyageurs par jour, il est l'un des réseaux les plus chargés au monde. Les quatorze lignes de métro et les lignes A et B du RER comptent près de 290 km de tronçons en souterrain et plus de 100 km d'ouvrages aériens. Le réseau de la RATP constitue donc un patrimoine conséquent, de valeur technique et financière importante et dont l'utilité dépend de son état de performance et de la manière dont il est maintenu.

Les conséquences des défaillances de ce patrimoine, intégré dans un environnement urbain très dense, peuvent dépasser largement le périmètre immédiat des infrastructures. Un mauvais fonctionnement du réseau de transports entraine des coûts sociaux et économiques, comme par exemple, une diminution de la productivité et de la compétitivité économique des pôles desservis (aéroports, centres touristiques, pôles d'emplois, entreprises, etc.) car le temps perdu n'est consacré ni aux loisirs ni à la production (Llanos, 1992). Ce type d'impacts est peu visible et difficile à quantifier. Les pires conséquences d'une gestion de patrimoine inadéquate se manifestent quand elles peuvent mettre en péril des vies humaines. A titre d'exemple, on peut évoquer l'effondrement de la voûte du tunnel SNCF de Vierzy en 1972, qui entraîna l'accident de deux trains. Le bilan humain de cette catastrophe fut très lourd : 108 morts et 111 blessées. C'est à partir de cet événement qu'une nouvelle stratégie de surveillance et de maintenance préventive a été instaurée par la RATP.

L'entretien et la surveillance des infrastructures de génie civil au sein de la RATP ont connu plusieurs périodes que l'on peut distinguer comme suit :

- Jusqu'aux années 1960 : entretien courant suite aux visites, aux inspections et aux signalements émis par les différents services d'exploitation et de maintenance. Pendant cette période, la politique de maintenance était principalement corrective, basée sur des opérations ponctuelles d'importance (reconstruction partielle d'ouvrages et chantiers ponctuels d'injection et de régénération) ;
- Dans les années 1960, les grandes opérations de création du RER intra-muros ont permis, à l'occasion des travaux exécutés à proximité des ouvrages du Métro, de constater l'état de l'extrados des maçonneries existantes. Suite à ces constats, les travaux de régénération de maçonneries ont débuté ;
- En 1972, l'effondrement du tunnel de Vierzy (ligne SNCF Paris-Laon dans l'Aisne) marque un point d'inflexion dans les stratégies de maintenance. Le 16 juin 1972, la voûte de ce tunnel s'effondrait, du fait de son très mauvais état et de l'absence d'entretien. En parallèle au groupe de travail mis en place en 1974 au niveau national, suite à cette catastrophe, la RATP émettait le rapport «Entretien des ouvrages souterrains». Deux ans après, une instruction technique provisoire définissait de nouvelles règles de surveillance, avec reconnaissances destructives des maçonneries, ainsi qu'un programme de régénération et de collage au terrain des maçonneries très intense. Ce programme manquait cependant de vision à long terme ;
- À partir des années 1990, en complément des politiques existantes, naît le Schéma Directeur de Maintenance (SDM) qui définit des politiques de maintenance projetées sur des périodes de dix ans (remises à jour régulièrement) ;

- En 2008, une instruction technique propre à l'entreprise, fruit de l'évolution de cinq réglementations internes depuis 1908, voit enfin le jour. Elle s'inspire fortement de l'Instruction Technique du 19 octobre 1979 établie pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art routiers, révisée en 1995.

La politique de maintenance actuelle, dans ses grandes lignes, est principalement une maintenance préventive conditionnelle. Le point de départ de la configuration des plans de maintenance est la surveillance périodique de tous les ouvrages qui composent le patrimoine de la RATP. Cette surveillance est principalement fondée sur des inspections visuelles qui visent à relever les désordres affectant l'état structurel des ouvrages. Ensuite, les gestionnaires doivent choisir et prioriser les ouvrages à traiter en fonction des résultats précédents et des différentes contraintes qui interviennent dans la gestion du patrimoine. Ce processus décisionnel est basé sur l'expertise des gestionnaires et n'est pas formalisé.

***Ainsi, développer des outils d'aide à la gestion du patrimoine qui réduisent la variabilité intrinsèque des actions de surveillance visuelle et le manque de transparence dans les décisions apparaît comme un objectif essentiel pour les gestionnaires de la RATP. Les enjeux sont avant tout d'assurer la sécurité des personnes et la qualité de service d'exploitation, mais aussi d'optimiser de la programmation des actions de maintenance dans un contexte où le budget est limité et les contraintes de plus en plus fortes. De tels outils permettraient de réaliser le choix et la hiérarchisation des actions de maintenance à réaliser sur l'ensemble du parc d'ouvrages de manière rationnelle.***

Dans la gestion d'un patrimoine d'infrastructures, l'évaluation du risque est prise comme un élément-clé de la prise de décision. Mais, à cause des contraintes financières et de celles imposées par les exigences de l'exploitation, elle n'est pas suffisante pour définir une stratégie optimisée de maintenance. Le recensement des ouvrages du patrimoine de la RATP a mis en évidence une grande variété de caractéristiques à prendre en considération, comme l'hétérogénéité des ouvrages, en termes d'âge et de méthode de construction, ou encore l'agressivité des environnements. De surcroît, à ces difficultés techniques, l'ensemble des aspects socio-économiques qui interviennent dans la gestion du patrimoine n'est pas formalisé. De même, aucune méthode proposant des critères de décision ou des indicateurs de performance susceptibles d'être intégrés dans un même outil n'a été développée.

***Ma recherche s'inscrit dans ce cadre. Son objectif essentiel est de proposer un outil d'aide à la gestion du patrimoine de la RATP, au travers de critères de décision qui formalisent les aspects techniques et socio-économiques intervenant dans la gestion d'un réseau de transport en service.***

A cet égard, nous proposons l'application de plusieurs méthodes : dans un premier temps, les méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement afin d'obtenir une modélisation fonctionnelle des mécanismes de dégradation des ouvrages ; dans un deuxième temps, les méthodes multicritère d'aide à la décision pour développer un outil d'aide à la gestion du patrimoine de la RATP. De tels outils scientifiques ont déjà été développés et appliqués sur d'autres parcs d'ouvrages de génie civil : routes, réseaux enterrés d'assainissement, ouvrages portuaires, etc. et apportent des solutions efficaces en termes de gestion durable des ouvrages.

Ce travail s'inscrit clairement dans le cadre d'un environnement professionnel fort, à vocation de contrôle, de diagnostic et de suivi des ouvrages de génie civil comme le patrimoine RATP et en particulier les tunnels en maçonnerie. Par conséquent, il est nécessairement mené en considérant les pratiques de la profession et présente une vocation applicative.
Dans une première partie, le contexte dans lequel nous travaillons est présenté. Nous introduisons le patrimoine d'infrastructures de la RATP objet de notre recherche, les caractéristiques de ces ouvrages et la méthode de gestion actuelle. Ensuite, on rappelle les

dispositifs généraux de gestion des ouvrages de génie civil, avec un focus sur les infrastructures de transport en particulier. Dans ce cadre, une étude bibliographique est réalisée sur les méthodes de gestion patrimoniale utilisées dans le domaine industriel comme pour les infrastructures de génie civil, en mettant l'accent sur les méthodes de gestion des réseaux de transports. Les résultats de cette étude permettent d'identifier les outils et méthodes applicables à notre problématique et conduire la recherche.

Dans la deuxième partie, nous présentons les méthodes scientifiques qui seront appliqués dans cette recherche : les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement et les méthodes d'aide à la décision multicritère. Ensuite, un panorama des différentes méthodes existantes est dressé avant de justifier le choix des méthodes les plus adaptées à notre cas.

La partie III est consacrée aux éléments de réponse pratique. Dans un premier temps, nous réalisons une modélisation fonctionnelle des mécanismes de dégradation des tunnels en maçonnerie (ce type d'ouvrages représente à peu près 60 % du linéaire du réseau RATP). L'application de l'Analyse Fonctionnelle (AF), de l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE), et des graphes causaux permet d'obtenir une modélisation du fonctionnement de ces ouvrages et de leurs mécanismes de dégradation. Ces résultats permettent d'identifier et de formaliser l'information sur laquelle nous construisons ensuite un critère de décision permettant d'évaluer la performance des ouvrages. Pour ce faire, les méthodes multicritère disponibles pour la construction de critères seront examinées et nous procéderons à l'application d'une méthode d'affectation à base de règles. Dans un deuxième temps, afin d'obtenir une famille cohérente de critères de décision, le critère de performance sera complété par d'autres critères de gestion patrimoniale formalisant les aspects socio-économiques considérés par les gestionnaires de la RATP. Nous examinons comment ces critères sont construits à partir de l'expertise et étudions les conditions nécessaires pour considérer comme cohérente une famille de critères de décision. Nous présentons ensuite la construction d'un outil d'aide à la décision spécifique pour la gestion patrimoniale des ouvrages de la RATP. Pour ce faire, nous développons une démarche combinant des méthodes ELECTRE. Cet outil permet, à partir d'un raisonnement fondé sur plusieurs critères, de choisir et de hiérarchiser les ouvrages qui feront partie des programmes de maintenance. Enfin, nous présentons l'application de l'outil développé sur la ligne 4 du métro de Paris. L'analyse de ce cas réel permettra d'identifier les bénéfices apportés par notre méthodologie et les axes d'amélioration qui devront être développés dans les recherches ultérieures.

# Partie I
# La gestion patrimoniale des ouvrages d'art

# Introduction de la Partie I

Cette première partie a pour objectif de présenter la gestion patrimoniale des ouvrages d'art et d'établir le cadre de recherche.

Le Chapitre 1 présente le patrimoine d'infrastructures de la RATP. L'analyse des caractéristiques de ce patrimoine, des principes de la gestion actuelle et des enjeux associés permettra de déterminer les axes d'amélioration qui définiront les objectifs de cette recherche.

Le Chapitre 2 introduit les concepts de la gestion patrimoniale et s'intéresse aux démarches existantes. Une étude de l'état de l'art dans les domaines de l'industriel et du génie civil visera à identifier les démarches et les méthodes scientifiques susceptibles d'être appliquées dans notre problématique.

Ce constat nous permet, dans le Chapitre 3, de proposer une démarche de recherche scientifique pour développer un outil d'aide à la décision, pour la gestion du patrimoine de la RATP.

# Chapitre 1. Les infrastructures de la RATP et les modes de gestion : enjeux et objectifs

Dans ce chapitre, le patrimoine des infrastructures de la RATP est présenté. Plus précisément, nous illustrons en détail les tunnels en maçonnerie construits selon la méthode franco-belge, dont la gestion est l'objet de ces travaux de recherche. Nous présentons ensuite la politique de maintenance RATP. Enfin, ce chapitre s'achève par une synthèse des besoins et axes d'amélioration qui justifient cette recherche.

## 1.1 *Le patrimoine d'infrastructures de la RATP*

Le patrimoine d'infrastructures de la RATP est constitué d'un ensemble d'ouvrages de génie civil destinés à assurer le transport de voyageurs en toute sécurité avec la meilleure qualité de service, dans un environnement urbain très dense (ville de Paris et sa banlieue proche).

L'établissement d'un chemin de fer au cœur de Paris a été étudié pour la première fois en 1855, mais c'est seulement en 1898 qu'il put être concrétisé. Cette longue période d'attente s'explique, si l'on songe à la complexité du problème, à la variété et aussi à la divergence des intérêts en cause et aux multiples difficultés de toute nature qu'il a fallu surmonter pour pouvoir démarrer sa construction. Même avant de sa mise en service, le patrimoine d'infrastructures de la RATP a toujours été soumis à des difficultés et des contraintes très sévères.

### *1.1.1 Un patrimoine hétérogène et vieillissant*

La première caractéristique de ce patrimoine est l'hétérogénéité structurelle des ouvrages qui le composent. La variété naturelle du sous-sol de Paris est telle qu'on ne voit guère de problème de construction souterraine qui n'ait pas été posé et qu'il a fallu résoudre par l'adaptation des méthodes de construction (Biette, 1928). A Paris, le sous-sol est formé de couches hétérogènes s'étageant de la craie (au sud-ouest) jusqu'aux sables de Fontainebleau (au nord-est) ; en outre, la nappe aquifère souterraine est présente presque partout à faible profondeur (Lamé, 2013).

Dans ce contexte hydrogéologique, le travail à grande profondeur a été difficile, dangereux et onéreux pour les ingénieurs parisiens de l'époque. La solution prédominante qu'ils ont adoptée a été le souterrain maçonné à double voie, en maintenant le tracé aussi près que possible de la surface du sol, sous la voie publique. Cette solution présente différents avantages :

- Un souterrain unique contenant les deux voies en facilite l'exploitation ;
- Un tracé à faible profondeur rend l'accès aux stations plus aisé, supprime l'incommodité et la dépense des ascenseurs ;
- Elle diminue ainsi les difficultés d'exécution et les impacts sur les bâtiments (impacts associés aux tassements produits par les excavations, lesquelles n'étaient pas bien maitrisées à l'époque).

Toutefois, les canalisations souterraines (égouts, conduites d'eau et de gaz, câbles électriques, etc.) déjà à l'époque présentes en grand nombre dans le sous-sol des voies publiques parisiennes (et dont la densité n'a fait qu'augmenter jusqu'à nos jours) a été la principale contrainte du tracé en surface (Biette, 1928).

La présence de la Seine à Paris a également eu un impact fort sur la construction des infrastructures de transport de la RATP : les lignes du réseau la croisent en effet en de nombreux points. Il a fallu à chaque fois opter pour des traversées aériennes ou sous-fluviales.

Les traversées aériennes ont nécessité la construction de viaducs monumentaux, aussi remarquables par leurs dispositions techniques que par leur décoration artistique. Tel est le cas, par exemple, du viaduc d'Austerlitz (fig. 1-1).

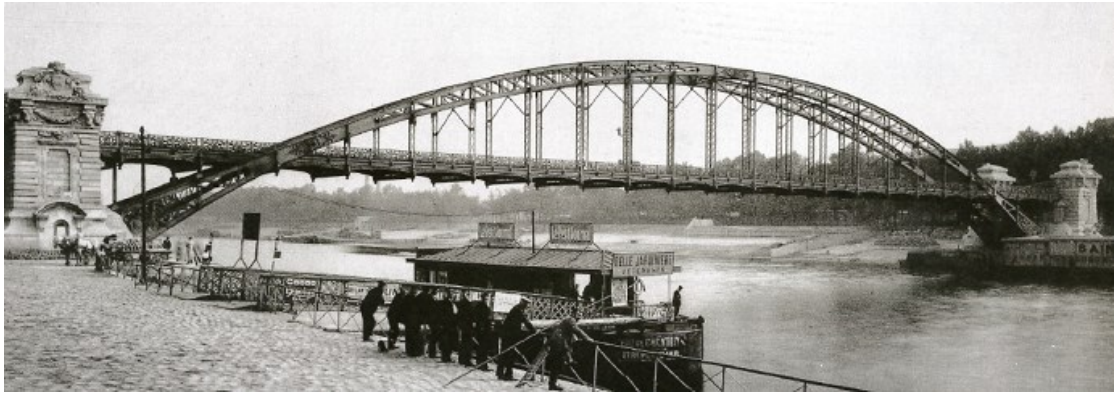


*Figure 1-1 : Viaduc d'Austerlitz. (Tricoire, 1999)*

Pour construire les tronçons de lignes du métro sous le lit de la Seine, plusieurs procédés ont été employés. Afin d'illustrer l'hétérogénéité des méthodes qui ont été appliquées, on peut citer les caractéristiques très particulières qui leur sont associées, le fonçage vertical sur caissons métalliques à l'air comprimé (fig. 1-2) et le cheminement horizontal par congélation du sol (fig.1-3).

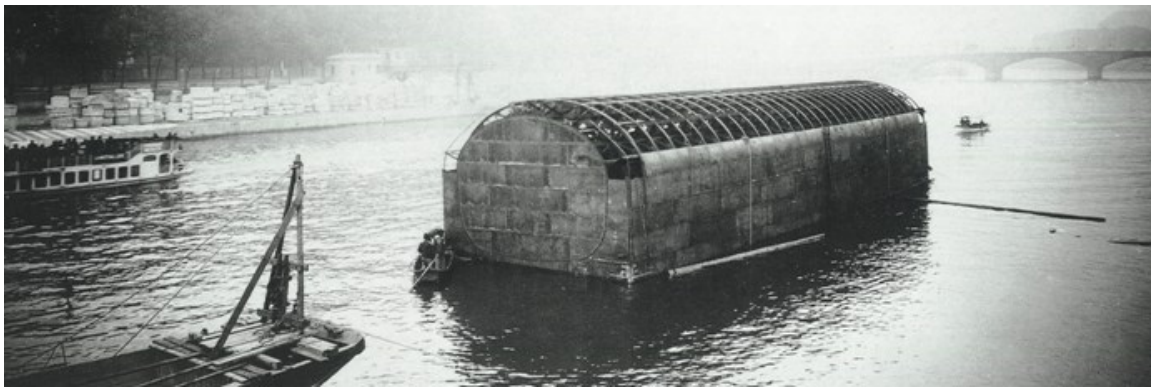


*Figure 1-2 : Caisson métallique pour la construction de la traversée sous-fluviale de la Seine entre Cité et Châtelet (ligne 4). (Tricoire, 1999)*

*Figure 1-3 : Construction de la traversée sous-fluviale par cheminement horizontal (Cité – Saint Michel, ligne 4). A gauche, emprise de chantier. A droite, usine de congélation pour la consolidation des terrains. (Tricoire, 1999).*

En dehors des traversées aériennes de la Seine, le réseau de la RATP comprend quelques parties aériennes aux points où les conditions topographiques du profil le justifiaient, c'est-à-dire : la traversée de la vallée de la Bièvre, la dépression de terrain qui sépare la colline de Montmartre du coteau de Belleville et la traversée des larges tranchées abritant les voies des Chemins de fer de l'Est et du Nord. Dans ces situations, un passage en souterrain aurait entraîné l'établissement du tunnel à grande profondeur avec des rampes importantes, ce qui aurait affecté les vitesses d'exploitation et l'implantation de stations profondes, de réalisation coûteuse et peu appréciées des voyageurs en raison des dénivelés.

Sur ces tronçons aériens, les voies sont supportées par un viaduc métallique formé d'une suite de travées indépendantes qui sont de portées variables et composées de deux poutres de rive soutenant le tablier à leur partie inférieure (fig. 1-4). Ces travées prennent appui sur des colonnes en fonte. Lorsque la stabilité des ouvrages requérait des appuis plus conséquents en raison de leur hauteur, les constructeurs adoptèrent des piliers en maçonnerie.

*Figure 1-4 : Viaduc aérien de type courant (ligne 5). (Tricoire, 1999).*

En dehors de ces raisons techniques, l'hétérogénéité du patrimoine de la RATP a également pour origine la dispersion des âges de construction et l'évolution des techniques et des matériaux employés. Il est possible de distinguer quatre périodes :

- De 1850 à 1890 : les premières lignes ferrées de banlieues sont déjà construites : Sceaux, Saint Germain, Bastille, Les Molineaux… des ouvrages anciens existants ont été adaptés pour l'exploitation du RER. Tel est le cas, par exemple, du viaduc de La Vallée (fig. 1-5).

*Figure 1-5 : Viaduc de La Vallée, construit en 1845 et réadapté pour l'exploitation du RER A en 1972.*

- De 1900 à 1939 : squelette principal du réseau Métro. Construction essentiellement en tunnels maçonnés, selon la méthode franco-belge (fig. 1-6). (Nous développerons cette méthode de construction dans § 1.1.3.1)

*Figure 1-6 : Tunnel en maçonnerie construit selon la méthode franco-belge*

- 1960 – 1980 : construction du RER. Mise en œuvre du béton armé et du béton précontraint : souterrains de voûte active (méthode Jacobson), couvertures du RER A et caissons de traversées sous-fluviales (fig. 1-7), etc.

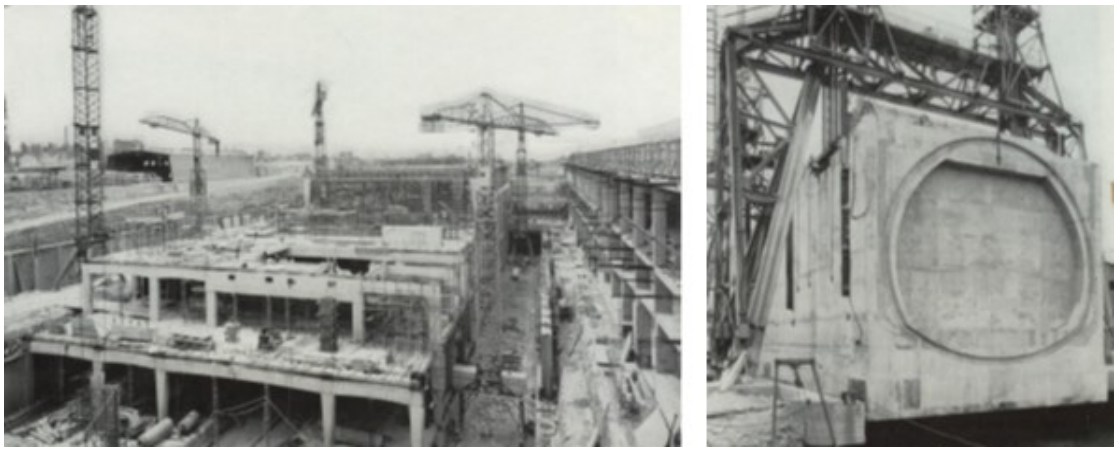


*Figure 1-7 : Application du béton précontraint dans la construction du RER. A gauche, construction de la gare de La Défense. A droite, caisson en béton précontraint de la traversée sous-fluviale entre Courbevoie et Neuilly. (Douroux, 2012)*

- 1995 – ce jour : développement du réseau automatique, prolongements de lignes existantes et tramways. Creusement des tunnels par tunnelier et revêtement en voussoirs préfabriqués (fig. 1-8).

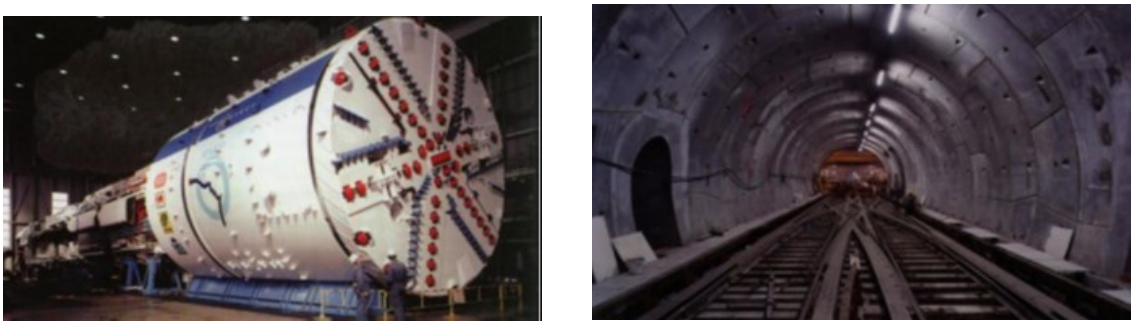


*Figure 1-8 : Construction par tunnelier (à gauche) et revêtement en voussoirs (à droite) de la ligne 14 de Métro (Douroux, 2012)*

D'autres ouvrages présentent des configurations spécifiques rendues nécessaires par la configuration de l'environnement : raccordements de lignes, passages en bâche, stations en correspondance. Elles représentent des cas très particuliers et beaucoup plus complexes.

Nous ne tentons pas ici de lister exhaustivement « tous les ouvrages » composant le patrimoine RATP (près de 9 000 ouvrages, chacun dans un environnement donné, avec une histoire de fonctionnement et de dégradation qui lui est propre…), mais plutôt d'introduire les familles d'ouvrages les plus représentatives du réseau, afin d'illustrer l'hétérogénéité qui caractérise le patrimoine, facteur déterminant pour sa gestion.

Dans ce contexte, une étude menée au cas par cas n'aurait aucun sens pour des ouvrages qui ont une faible valeur individuelle, mais dont l'importance réside dans leur contribution au fonctionnement global du réseau de transport. La gestion doit être donc abordée à l'échelle du « parc d'ouvrages ».

La diversité d'âges des infrastructures n'est pas sans conséquence dans notre étude. Les ouvrages les plus anciens demandent plus d'interventions correctives (et parfois à caractère urgent), qui visent à prolonger leur durée de vie et à s'adapter aux évolutions des exigences d'exploitation, alors que les ouvrages plus récents sont principalement objet de travaux

préventifs. En outre, la variété des vitesses de dégradation entre les ouvrages vieillissants et les ouvrages modernes rend difficile l'obtention de lois de dégradation valables pour la globalité du patrimoine. Dans ces circonstances, une définition efficace des stratégies de maintenance impose de gérer des échelles de temps fort diverses.

### *1.1.2 Le recensement du patrimoine d'infrastructures de la RATP*

Le patrimoine de la RATP est composé par 14 lignes de métro et 2 lignes de RER. Il compte près de 290 km de tronçon en souterrain (tunnels et tranchées couvertes) et plus de 100 km d'ouvrages aériens (viaducs, ponts et remblais / déblais).

Parmi les ouvrages souterrains, 250 km appartiennent au réseau du Métro (dont 85% construit avant 1969 et 50% avant 1920), et 40 km au réseau du RER (dont 90% construit entre 1960 et 1980).

Comme indiqué dans le chapitre précédent, quelques ouvrages construits au cours du XIXème siècle ont été réadaptés pour l'exploitation du RER (exemple du viaduc de La Vallée construit en 1845 par la SNCF, renforcé et incorporé au patrimoine RATP en 1970 pour l'exploitation de la ligne du RER A).

La RATP a recensé son patrimoine dans une base de données qui est constamment actualisée et portée à la connaissance de toutes les parties concernées par la gestion. D'après ce recensement d'ouvrages, nous avons pu dégager une première répartition des différents types d'ouvrages composant le patrimoine d'infrastructures de génie civil de la RATP.

| **Type d'ouvrage** | **m** | **%** |
|---|---|---|
| Fosse de visite | 5 201 | 1,51% |
| Galerie technique | 4 935 | 1,43% |
| Mur de soutènement | 1 489 | 0,43% |
| Ouvrage cadre | 11 731 | 3,41% |
| Ouvrage spécial | 7 970 | 2,32% |
| Passage supérieur / inférieur | 994 | 0,29% |
| Plancher | 4 771 | 1,39% |
| Tranchée couverte | 42 764 | 12,43% |
| Tranchée ouverte | 2 237 | 0,65% |
| Tunnel | 253 228 | 73,61% |
| Viaduc | 8 697 | 2,53% |

*Tableau 1-1 : Distribution du patrimoine RATP par type d'ouvrages (mètres linéaires et pourcentage)*

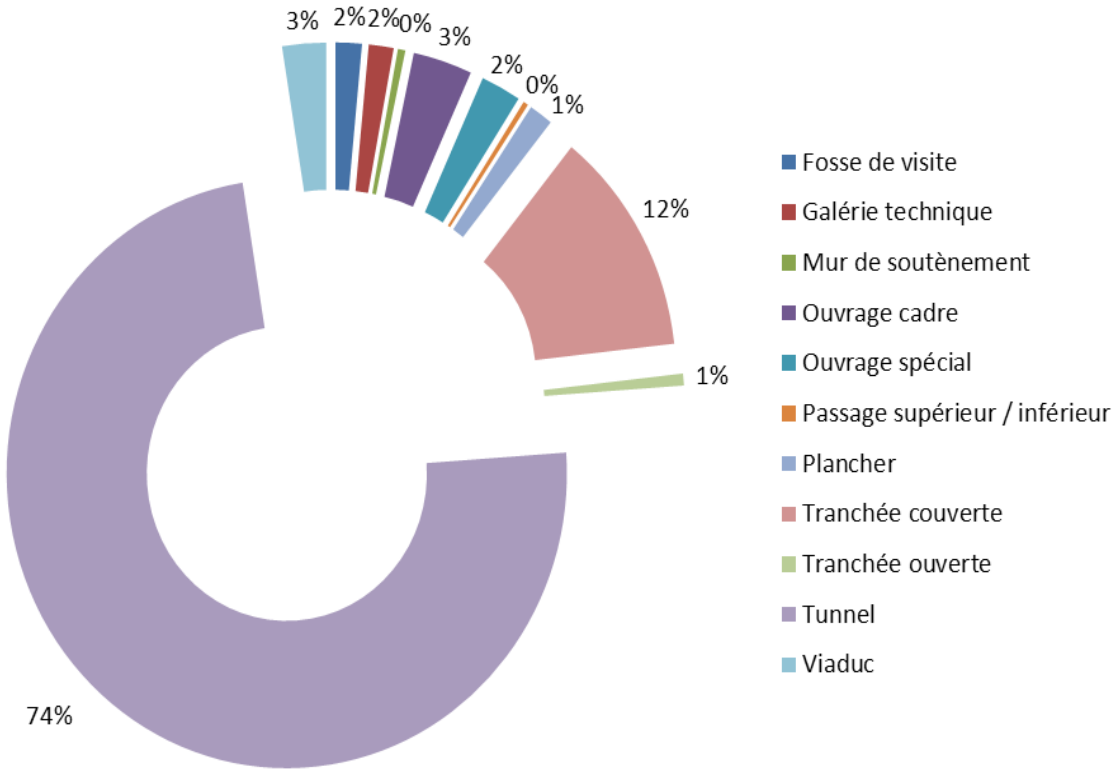



*Figure 1-9 : Distribution du patrimoine RATP par type d'ouvrages (pourcentage)*

#### *1.1.2.1 Les tunnels (250 km, 74% du total du réseau)*

Les tunnels constituent l'essentiel du patrimoine d'infrastructures de la RATP, près des deux tiers de tout le patrimoine. Les méthodes de construction et les matériaux employés ont évolué dans le temps. Selon la figure 1-10, les tunnels maçonnés représentent plus du 80% des tunnels (environ 60% de la globalité du réseau RATP).

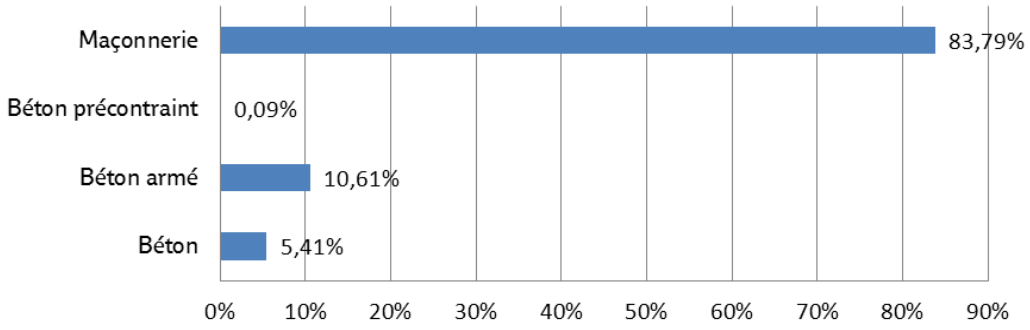



*Figure 1-10 : Distribution des tunnels en fonction du matériau de construction*

La construction des tunnels maçonnés a été prédominante pendant la première étape de construction du métro et deux méthodes lui sont associées : le creusement au bouclier et par la méthode franco-belge.

Le creusement au bouclier (fig. 1-11) a été testé sur la ligne 1 en 1899. On pensait que le bouclier de percement permettrait d'atténuer les tassements à la surface du sol ; les débuts furent cependant difficiles. De plus, son prix élevé en limitait le nombre. Dans ces conditions, et

soumis à des délais de construction très contraints, le procédé du bouclier fut rapidement abandonné.

*Figure 1-11 : Bouclier de percement pour la construction des tunnels maçonnés. (Tricoire, 1999)*

On s'orienta donc vers des méthodes plus efficaces et plus rapides, comme celle des galeries boisées, communément appelée méthode franco-belge. Vue l'importance de cette méthode de construction sur la globalité du patrimoine RATP, nous l'expliquerons en détail dans la suite du document (§ 1.1.3.1).

Avec le développement des techniques de construction, le béton a progressivement remplacé la maçonnerie comme matériau de construction. Pour ne citer que quelques exemples, on peut trouver la construction de la ligne 14 au tunnelier associé à un revêtement en voussoirs en béton armé, et les traversées sous-fluviales de la ligne 13 par caissons en béton précontraint (fig.1-12).

*Figure 1-12 : Caisson en béton précontraint pour la traversé sous-fluviale de la ligne 13 à Invalides (Douroux, 2012)*

#### *1.1.2.2 Les tranchées couvertes (40 km, 12% du total du réseau)*

Les dispositions adoptées par les ingénieurs spécifiaient que lorsque la distance entre les rails et le niveau du sol était inférieure à 6 m, les tunnels (et les stations) devaient être non voûtés. Dans ce cas, la tranchée couverte s'avérait comme la méthode de construction la plus adaptée.

La figure 1-13 montre le pourcentage de tranchées couvertes présentes dans le patrimoine RATP, par type de matériau qui les constitue.

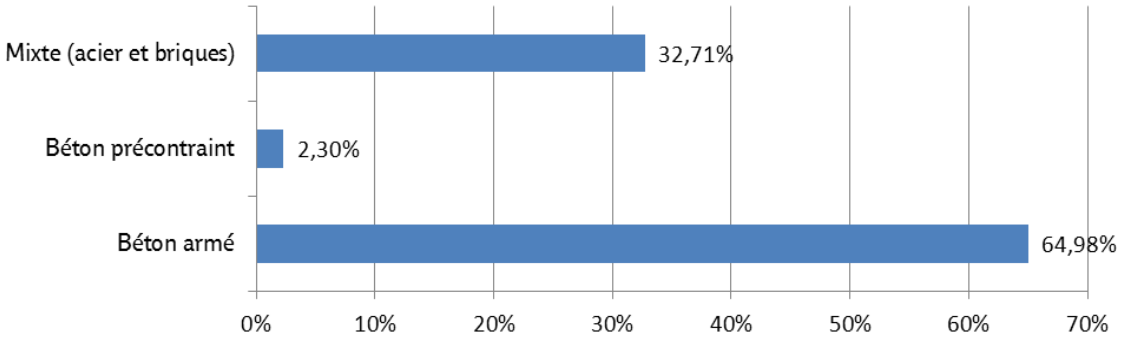



*Figure 1-13 : Distribution des tranchées couvertes en fonction du matériau de construction*

Les tabliers des tranchées couvertes réalisées en 1899 sont constitués d'un tablier de poutres métalliques et de voûtains en briquettes (fig. 1-14).

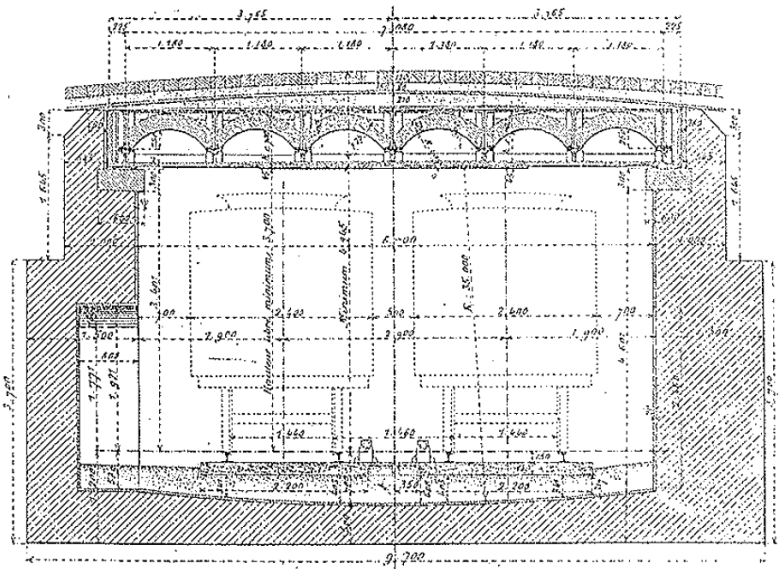


*Figure 1-14 : Section transversale d'une tranchée couverte en tablier mixte (acier et brique). (Biette, 1903).*

La construction de ces tranchées couvertes se réalisait selon le mode opératoire suivant :

- Construction des piédroits en souterrain ;
- Déblaiement de la fouille à ciel ouvert ;
- Réalisation des appuis ;
- Mise en place du tablier: ce tablier est composé par un quadrillage formé par poutres métalliques et fermé par des voûtains en briques ;
- Terrassement du stross à l'abri de la couverture ;
- Construction du radier maçonné ;
- Reconstitution du corps de chaussée, sur l'épaisseur restant entre le niveau de la future voirie et l'extrados de l'ouvrage.

Avec le développement du béton, les couvertures des tranchées couvertes les plus récentes ont été réalisées en béton armé (fig. 1-15).

*Figure 1-15 : Tranchée couverte en béton armé. (Douroux, 2012)*

#### *1.1.2.3 Ouvrages cadre (12 km, 3% du total du réseau)*

Ce type de structure se compose d'un radier plat, de piédroits verticaux et d'une dalle supérieure qui sont solidarisés entre eux pour constituer une structure monolithique. Les ouvrages cadres sont principalement construits en béton armé coulé en place mais peuvent éventuellement être composés d'éléments préfabriqués.

Ce type de construction est utilisé à partir de 1960 pour les franchissements en passage supérieur ou inférieur, les traversées sous-fluviales ou les prolongements des lignes (fig. 1-16).

*Figure 1-16 : Ouvrage cadre en béton armé (extrémité ligne 1)*

#### *1.1.2.4 Les viaducs (9km, 3% du total du réseau)*

A l'égal des tunnels, l'implantation des viaducs doit respecter le tracé des rues existantes. Afin de permettre le passage des plus hauts poids lourds qui circulent dans Paris, la hauteur libre sous les poutres des viaducs doit être de 5,20 m minimum.

Différents types de viaducs son présents dans le patrimoine RATP (fig. 1-17).

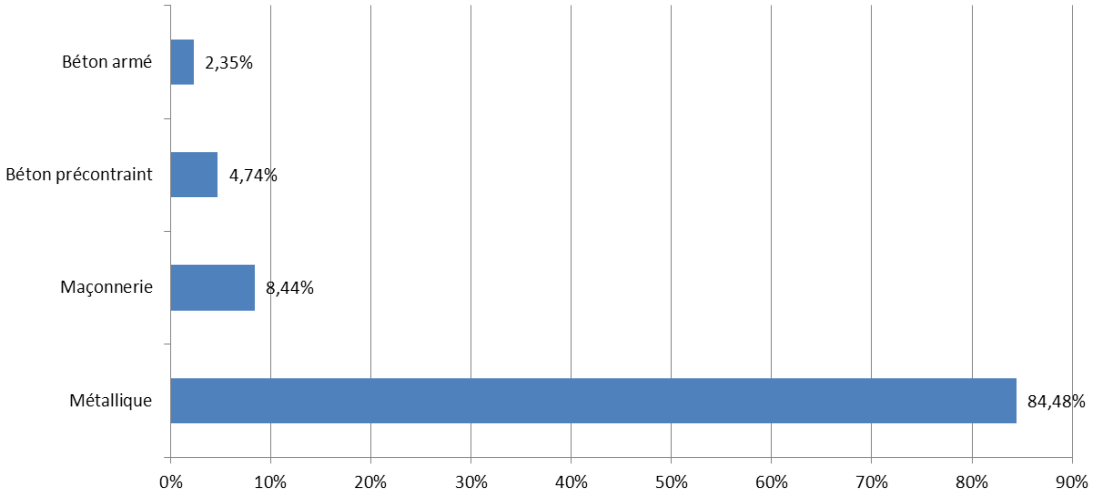



*Figure 1-17 : Distribution des viaducs en fonction du matériau de construction*

Une fois encore, cette famille d'ouvrages présente une hétérogénéité en termes de matériaux et de méthode de construction : on trouve des viaducs en maçonnerie datant du XIXème siècle (viaduc de La Vallée), des viaducs en béton précontraint des années 70 (pont de Clichy (fig. 1-18)), etc.

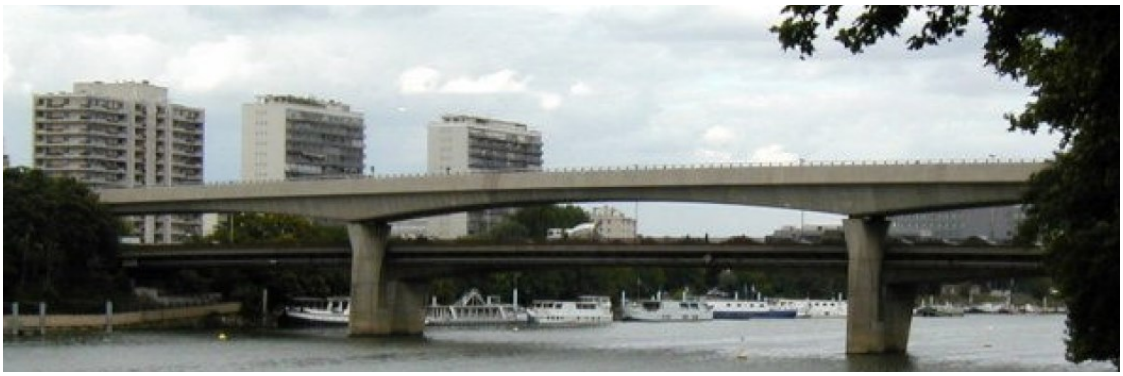


*Figure 1-18 : Viaduc en béton précontraint. (Douroux, 2012)*

Le plus fréquemment rencontré sur le réseau (> 80% des viaducs) est le viaduc métallique de type courant (fig. 1-19).

*Figure 1-19 : Viaduc métallique de type courant (Combes, 2014)*

Les poutres et les tabliers des viaducs du Métro ne présentent aucune particularité méritant de retenir l'attention ; c'est, si l'on peut dire, de la construction métallique courante. Les travées sont constituées par deux poutres de rive réunies l'une à l'autre par des entretoises transversales et contreventées dans le plan inférieur par des entretoises. Des voûtelettes en briques (axées dans le sens du tracé) comblent les vides entre entretoises. L'ensemble de cette structure dispose d'une étanchéité protégée par une chape en béton.

#### *1.1.2.5 Ouvrage spécial (8 km, 2% du total du réseau)*

Certains ouvrages se singularisent dans leur forme en raison de leur environnement, de l'interaction avec des réseaux concessionnaires ou de la superposition de nouvelles lignes en construction (fig. 1-20).

*Figure 1-20 : Ouvrage spécial pour la construction de la ligne 7 sous la ligne 3. (Tricoire, 1999).*

### *1.1.3 Les tunnels maçonnés*

Le tunnel maçonné, construit selon la méthode franco-belge, est l'ouvrage le plus représentatif du patrimoine d'infrastructures de la RATP ; le réseau en compte 212 km, soit plus du 60% du total.

Ce type de structure a été utilisé dès les premiers temps de la construction du chemin de fer parisien, avec une période très intense comprise entre 1900 et 1920 (les derniers ouvrages maçonnés datant de la fin des années 60). On peut donc considérer aujourd'hui qu'environ 50% des tunnels du réseau parisien est plus que centenaire.

Comme précédemment dit, le profil retenu est celui du tunnel à deux voies. La section maçonnée comporte une voûte elliptique, deux piédroits généralement à parements légèrement curvilignes et un radier plat (fig. 1-21). Dans les cas où le tunnel était creusé sous la nappe phréatique, le radier adoptait une forme contre voûtée pour mieux résister aux pressions hydrostatiques.

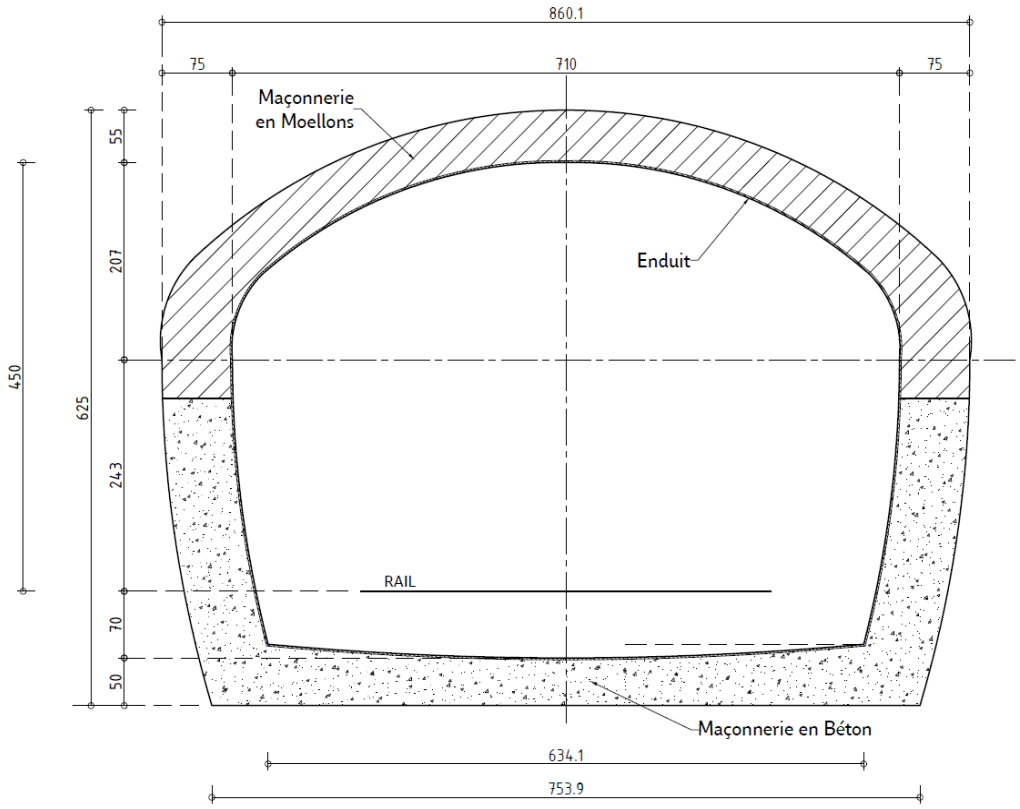



*Figure 1-21 : Section souterrain à deux voies, type courant*

A la méthode de construction franco-belge sont associés les principaux défauts observables sur le patrimoine RATP. Nous considérons qu'il est nécessaire d'expliquer en détail cette méthode de construction pour bien comprendre l'origine des désordres et les actions d'entretien correspondantes.

#### *1.1.3.1 La méthode de construction franco-belge*

Pour l'exécution du souterrain, la méthode employée est, presque sans exception, la suivante : construction préalable de la voûte, reprise des piédroits en sous-œuvre, enlèvement du noyau de terre central désigné sous le nom de « stross » et, finalement, réalisation du radier.

La première étape consiste à percer une galerie d'avancement à la partie supérieure et dans l'axe de la section, en soutenant les terres au moyen de coffrages en planches en bois qui prennent appui sur des cadres en charpente (fig. 1-22). Cette galerie est calée altimétriquement pour que son ciel corresponde au futur extrados du tunnel terminé.

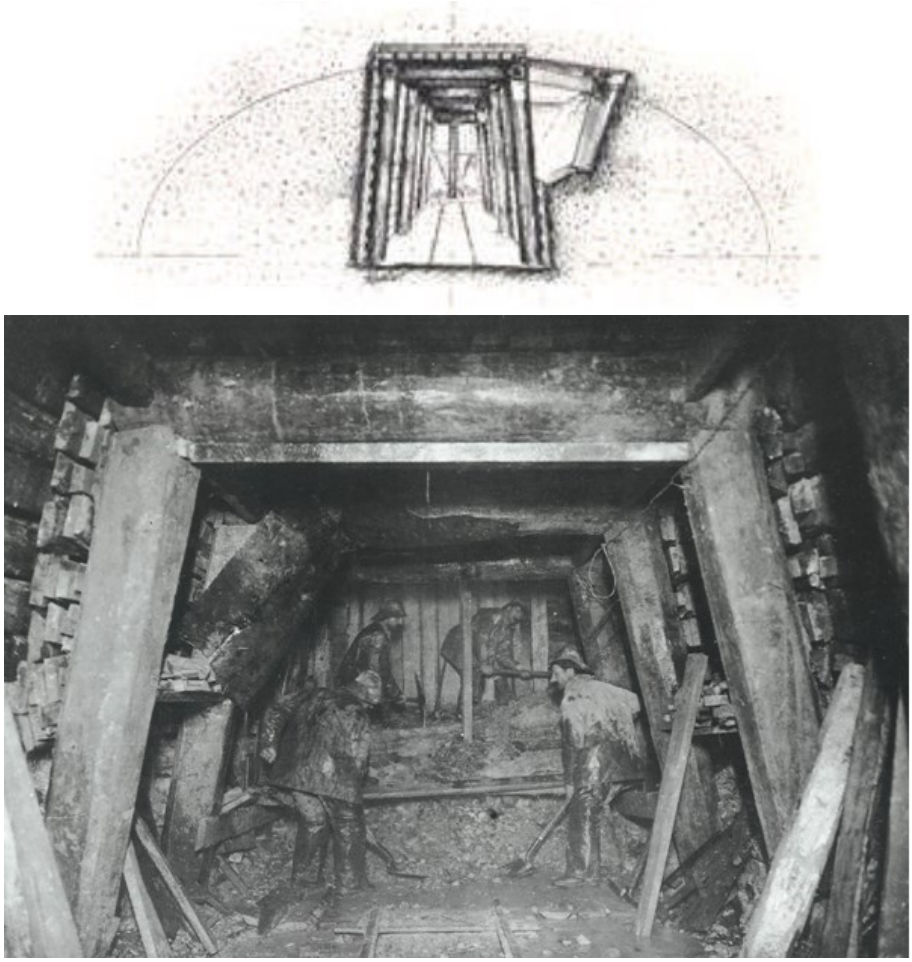


*Figure 1-22 : Percement de la galerie d'avancement. (Tricoire, 1999).*

Lorsque la galerie d'avancement est percée sur une certaine longueur, on procède au terrassement de la voûte par abattages latéraux : on déblaie, on abat les terres de part et d'autre de la galerie en suivant le profil extérieur de la voûte jusqu'à la ligne des naissances (limite entre la voûte et les piédroits). Le terrain est soutenu au fur et à mesure au moyen de planches en bois supportées par des longrines disposées parallèlement à l'axe du souterrain et que soutiennent des boisages en éventail prenant appui sur le sol de la galerie (fig. 1-23).

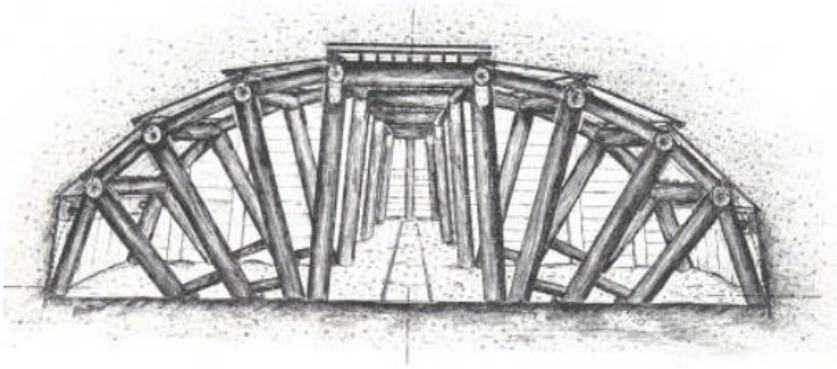


*Figure 1-23 : Terrassement de la voûte et étaiement provisoire en bois pour le soutènement du terrain (Biette, 1903)*

L'abattage étant achevé, on exécute la maçonnerie de la voûte mise en place symétriquement depuis la base vers la clé de voûte lors de la phase de « changement des bois ». (fig. 1-24).

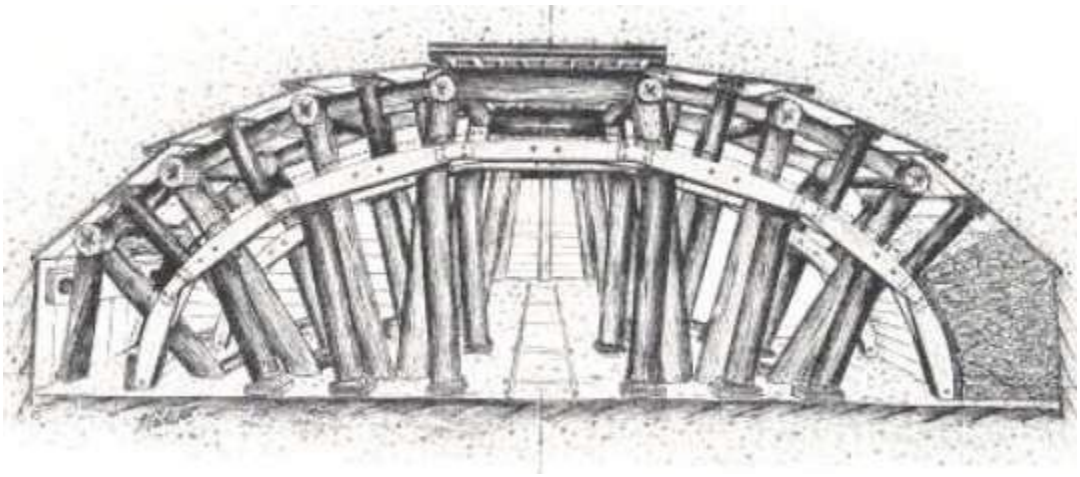


*Figure 1-24 : Début de l'exécution de la maçonnerie par les naissances de la voûte. (Biette, 1903)*

La maçonnerie était réalisée par la pose de blocs meulières ou de pierres calcaires joints par du mortier de ciment. La maçonnerie était arrêtée de 25 à 35 cm de part et d'autre de l'axe de la voûte (fig. 1-25) avant de procéder au clavage (cette étape est un des points critiques de cette méthode de construction et sera détaillée dans § 1.1.3.2).

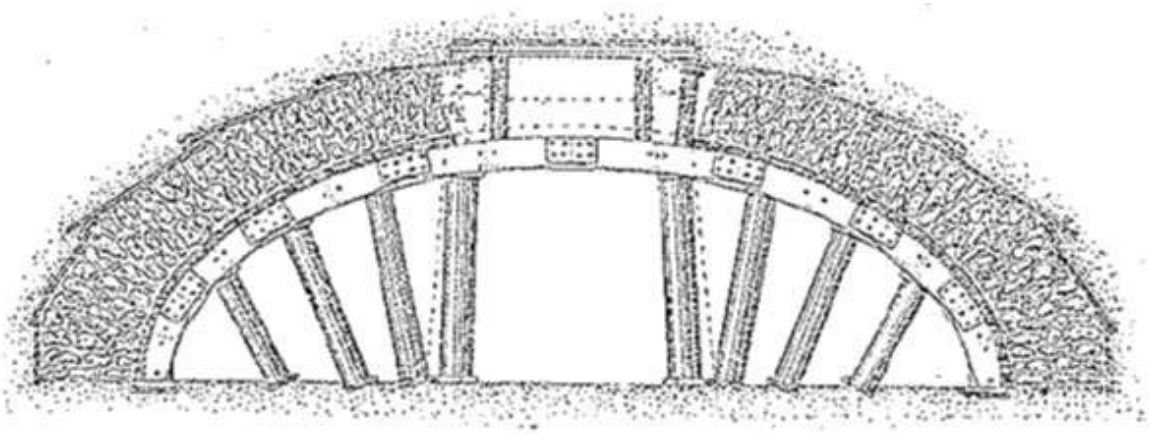


*Figure 1-25 : Exécution de la maçonnerie symétriquement sur le cintre. En attente de clavage. (Biette, 1903)*

La figure 1-26 représente un vrai exemple de construction de la voûte. Dans la partie supérieure, comme l'indiquent les flèches rouges, on comprend pourquoi le bois de blindage reste abandonné entre le terrain et la maçonnerie : ce phénomène est l'une des principales sources des désordres associés à la méthode franco-belge. Il sera détaillé en § 1.1.3.2.

*Figure 1-26 : Construction de la voûte. (Tricoire, 1999).*

Lorsque plusieurs anneaux de voûte sont terminés, on exécute le déblaiement du « stross ». On procède d'abord au creusement d'une tranchée longitudinale de section trapézoïdale (cunette), s'étendant en profondeur du niveau de la base de la voûte jusqu'à celui supérieur du radier. On laissait de chaque côté une banquette de terre suffisante pour prévenir tout risque d'éboulement (fig. 1-27).

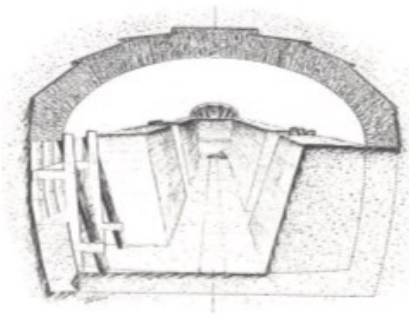


*Figure 1-27 : Décoffrage de la voûte et creusement du « stross ». (Tricoire, 1999).*

On construit ensuite les piédroits par une reprise en sous-œuvre, par plots alternés, dans les banquettes latérales. Sous la retombée de la voûte, des pièces de bois la soutenaient pour permettre le déblaiement de la terre entre le niveau des naissances de la voûte et celui de la partie inférieure du radier.

Cette technique était réalisée dans les terrains ayant une bonne tenue. Dans le cas contraire, on conservait un merlon central pour servir de massif d'appui durant les phases de bétonnage des piédroits (fig. 1-28).

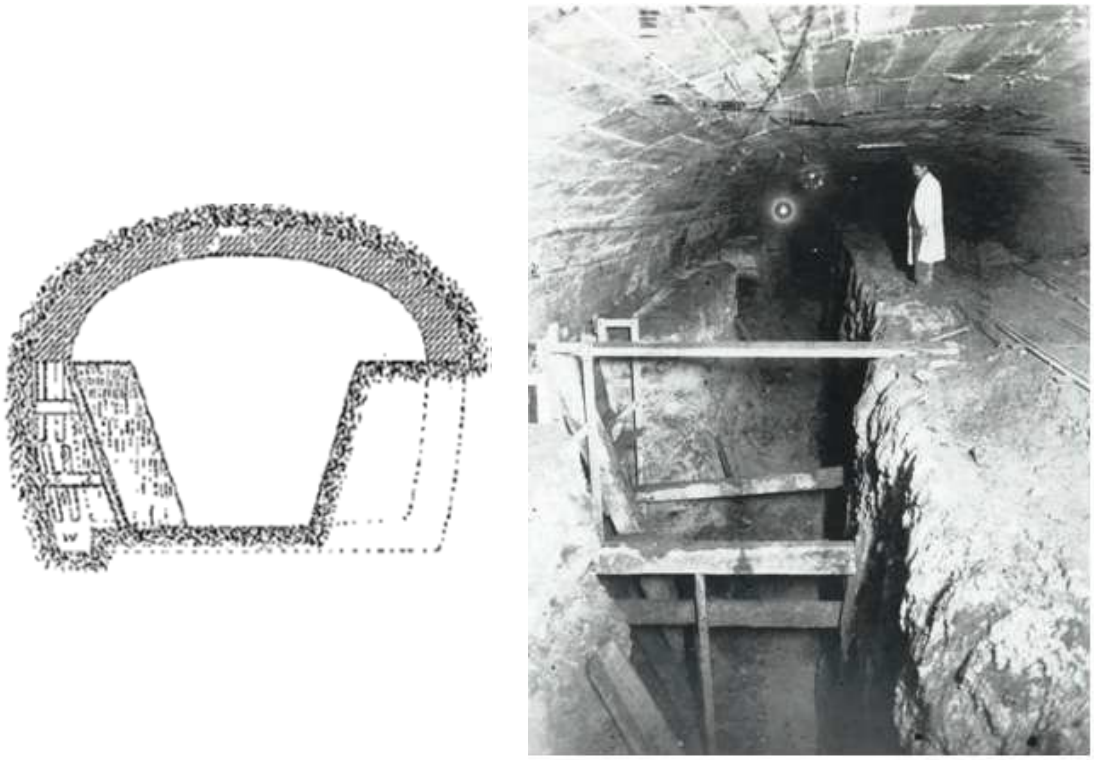


*Figure 1-28 : Terrassement du « stross » et coffrage pour la construction des piédroits. (Tricoire, 1999).*

Une fois l'emplacement du piédroit complètement déblayé, on met en place un coffrage en bois pour permettre le coulage d'un béton grossier qui constitue, dans le cas général, la maçonnerie du piédroit. En vue de la reprise ultérieure du radier, on ménage à la base du piédroit un arrachement horizontal. Puis, on bétonne la base du piédroit dès le niveau inférieur du radier jusqu'à la naissance (fig. 1-29). Comme dans le cas de la construction de la voûte, le bois de blindage reste perdu derrière la maçonnerie. Finalement les piédroits sont clavés à la voûte. Ce clavage est aussi un des points critiques de la méthode de construction. Il sera détaillé dans § 1.1.3.2.

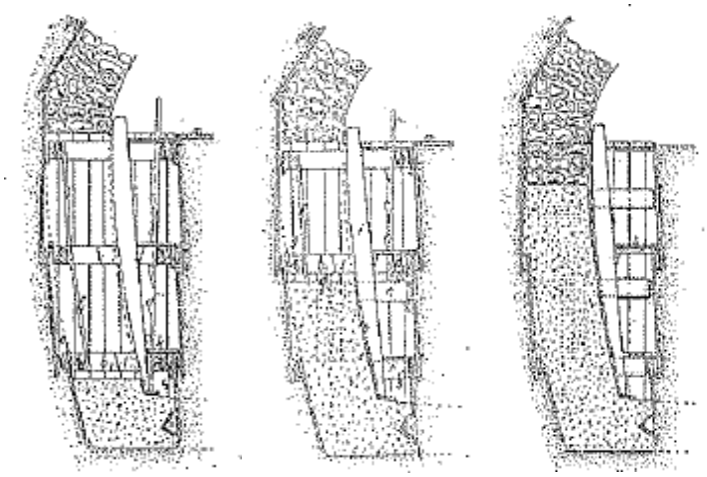


*Figure 1-29 : Bétonnage des piédroits. (Biette, 1903).*

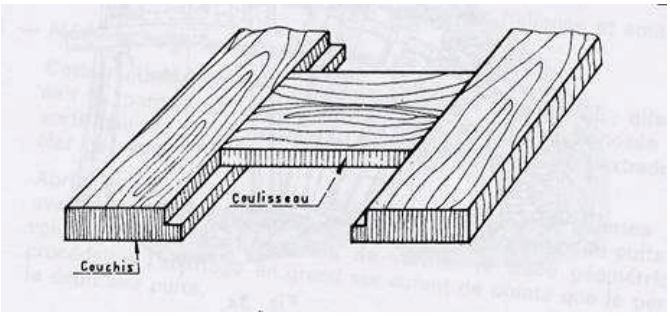
L'anneau de voûte sera alors considéré comme achevé lorsque le volume de terre correspondant à l'épaisseur du radier aura été terrassé et le radier en béton réalisé.

### *1.1.3.2 La méthode franco-belge : les points critiques de la construction*

***Le clavage au droit de la clé de voûte***

L'exécution de la maçonnerie commençait au niveau des naissances de la voûte et avançait symétriquement en direction ortho-radiale. Cette façon de procéder gênait la capacité de manœuvre des ouvriers quand un anneau de voûte était sur le point d'être complété. Dans cette situation, la pose de la maçonnerie ne pouvait pas se réaliser correctement et la construction s'arrêtait à25 à 35 cm de part et d'autre de l'axe (fig. 1-25).

Restait alors à terminer ce dernier intervalle d'environ 50 à 70 cm, qui correspondait à peu près à la largeur de hanches d'un ouvrier. Le maçon avait ainsi accès à toute l'épaisseur de l'anneau en construction. Pour l'exécution de la clé de voûte, le coffrage était réalisé par les coulisseaux en bois disposées transversalement par rapport à l'axe du tunnel et s'appuyant sur des couchis dotés d'une feuillure (fig. 1-30, en haut). La clé de voûte était maçonnée, à partir de l'anneau précédent, par petites parties et avançait successivement vers l'extérieur jusqu'à compléter l'anneau de voûte en cours (fig. 1-30, en bas).



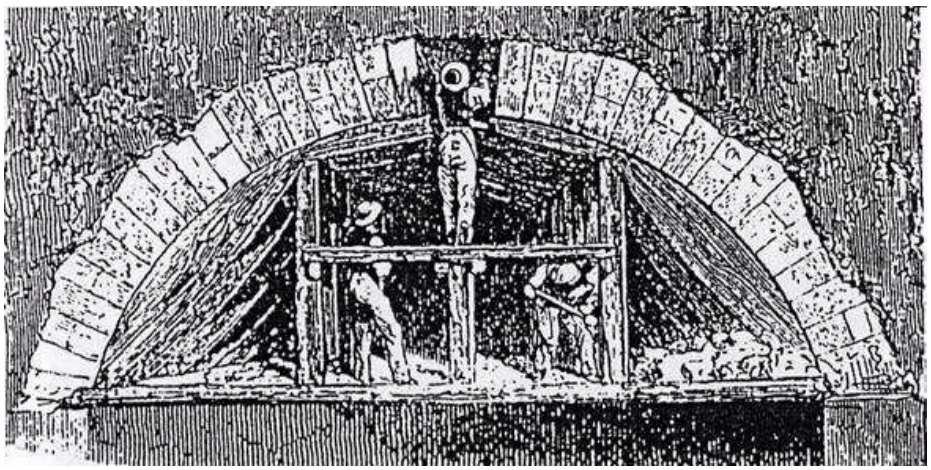



*Figure 1-30 : En haut, coulisseau en bois pour la construction de la clé de voûte. En bas, avancement de la construction dans le sens longitudinal de l'axe du tunnel. (SNCF, 1975)*

***Clavage des piédroits et la voûte***

Les techniques de construction de l'époque ne permettaient pas de bétonner l'anneau jusqu'à la voûte dans des conditions optimales. C'est pourquoi, on a arrêté le bétonnage à 0,50 m au-dessous du niveau des naissances de voûte. La construction du piédroit est achevée par un clavage à la voûte en insérant des pierres plates de grandes dimensions sensées assurer un contact optimal. Ce clavage présente le risque d'une sous-épaisseur, comme en témoigne la photo de la figure 1-31, prise lors de la réalisation du débranchement de la ligne 4 à Porte d'Orléans.

*Figure 1-31 : Défaut de clavage entre voûte et piédroit (Goirand, 2012)*

Dans cette situation, la transmission d'efforts entre la voûte et le piédroit s'effectue sur une surface réduite, ce qui provoque une augmentation des contraintes de compression localisée pouvant dépasser la résistance du matériau. Ce phénomène se manifeste par l'écrasement de la maçonnerie au niveau des naissances.

#### *1.1.3.3 Les désordres associés à la méthode de construction franco-belge*

***Le pourrissement du bois de blindage***

Après l'achèvement du tunnel, les bois de blindage demeurent abandonnés entre le terrain et le revêtement. Les variations d'humidité provoquent leur pourrissement et donnent lieu en conséquence à la création de vides à l'extrados du tunnel. De surcroît, derrière les planches de coffrage subsistent toujours des vides causés par l'enfilage des boisages latéraux sur les longrines de charpente. Il convient donc de les combler pour recréer la butée ouvrage-terrain (fig. 1-32).

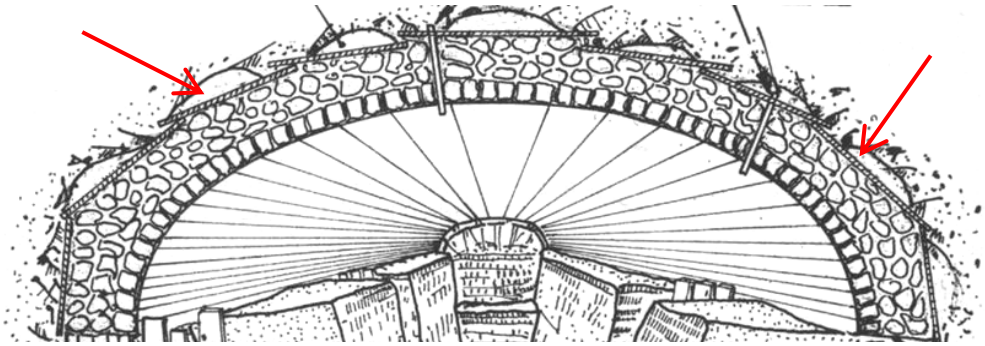


*Figure 1-32 : Bois de blindage et vides à l'extrados du tunnel (SNCF, 1975)*

Pendant la phase d'achèvement de la construction, des injections de coulis de ciment ont été prévues pour combler les vides et protéger le bois de blindage du pourrissement au niveau de la voûte, des piédroits et sous radier lorsque le tunnel se trouve dans un environnement humide (fig. 1-33). Mais dans les faits, ces injections nécessitant du temps et de l'argent, elles n'ont malheureusement pas été réalisées partout.

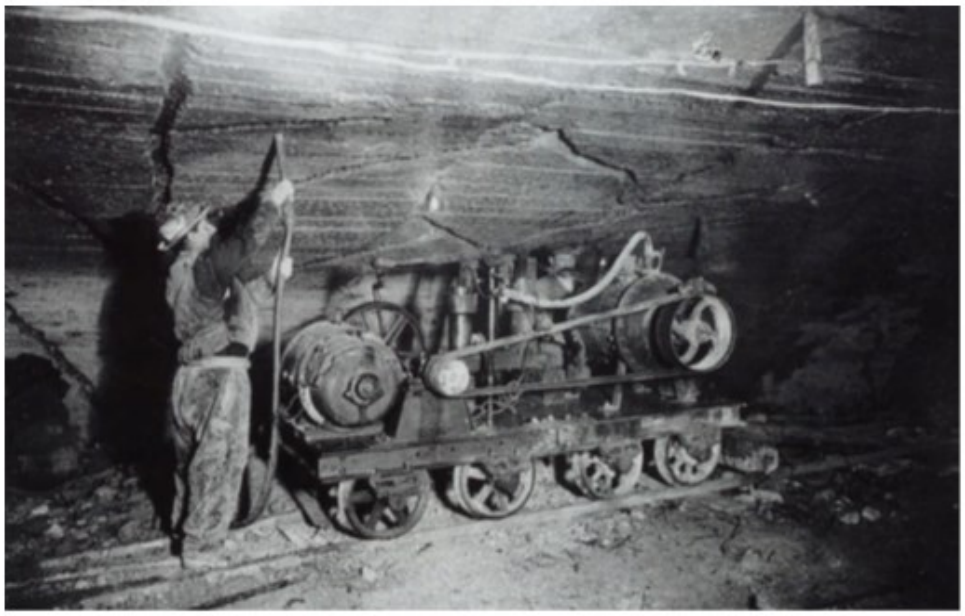


*Figure 1-33 : Injection de collage derrière le revêtement. (Tricoire, 1999).*

De surcroît, la circulation d'eau dans les terrains et au niveau de l'extrados des tunnels peut provoquer la création de vides et le développement de ceux existants, et par voie de conséquence le pourrissement du bois de blindage par variation d'humidité. Quand ce phénomène se produit en voûte, le poids propre du terrain et les vibrations produites par la circulation en voirie contribuent au comblement des vides. Mais ce n'est pas le cas pour les piédroits, pour lesquels ces vides peuvent se développer jusqu'à provoquer une perte de butée avec le terrain encaissant.

Or, le tunnel maçonné n'est pas auto-stable par lui-même et a besoin d'être constamment maintenu en compression pour assurer sa stabilité. Une perte de butée provoquerait la déformation du tunnel, et pourrait donner lieu à la formation de rotules et de fissures comme indiqué dans la figure 1-34.

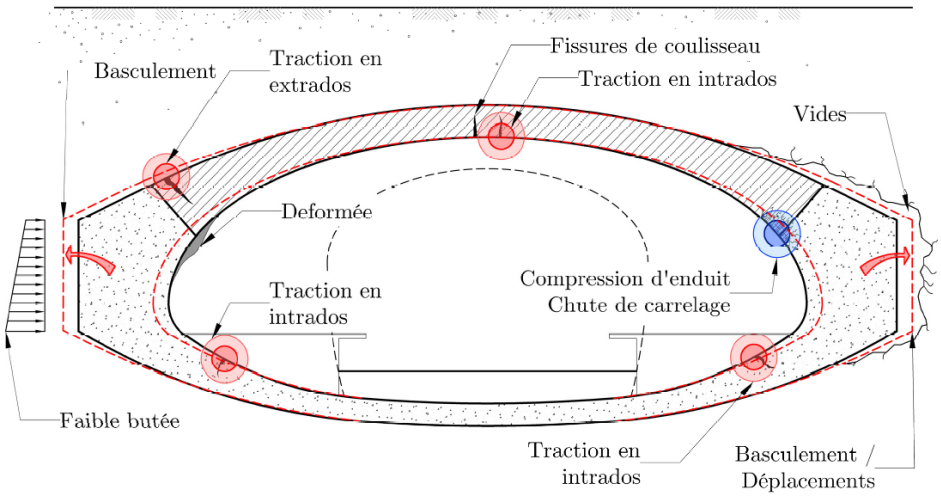



*Figure 1-34 : Déformation du tunnel provoquée par la perte de butée (Moreno, 2012)*

Ces désordres sont eux-mêmes sources d'infiltrations à l'origine d'altérations des revêtements, ce qui converge vers une situation de cercle vicieux de dégradation des tunnels.

***L'absence d'étanchéité***

Les tunnels maçonnés construits selon la méthode franco-belge ne comportent pas d'étanchéité. La maçonnerie qui constitue ces tunnels étant un matériau quelque peu poreux, elle est perméable à l'eau, d'autant plus en présence de fissures. Pour éviter que ces eaux qui s'infiltrent au travers de la maçonnerie ne viennent s'écouler à l'intérieur du tunnel, un système de drainage et d'enduits peut être mis en place.

En intrados des voûtes et des piédroits, de petits drains circulaires sont disposés en forme de pattes d'oies et viennent déboucher au niveau du radier (fig. 1-35). Les eaux recueillies par ces drains sont dirigées vers le drain central grâce à la forme de pente du radier. Ces drains sont collectés dans des fosses équipées de pompes qui évacuent les eaux vers le réseau d'égout ou le système de canaux.

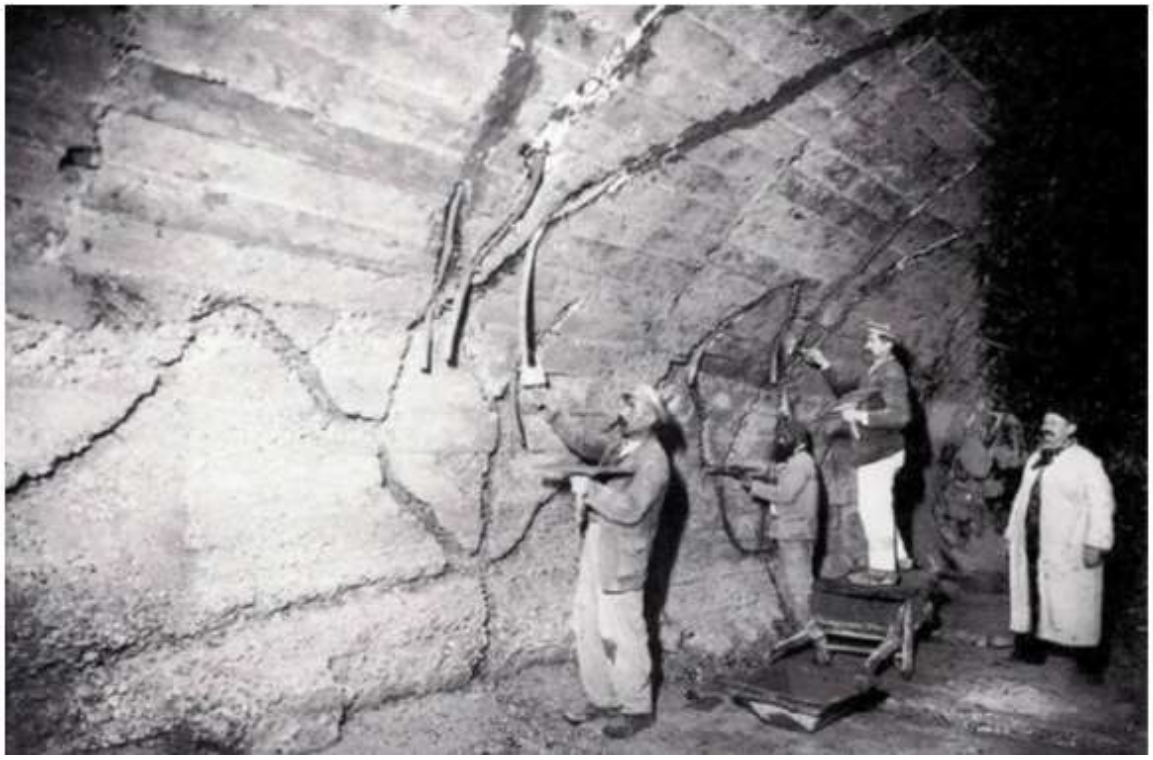


*Figure 1-35 : Construction de drains.(Tricoire, 1999).*

L'enduit est une couche de mortier de ciment, finement appliquée à l'intrados sur tout le périmètre du tunnel, et a une double fonction : corriger les défauts visuels de la construction et, principalement, collecter les infiltrations et les diriger vers les drains, en créant un « effet de parapluie » qui protège les espaces des infiltrations.

***Fissures en clé de voûte***

Comme indiqué en § 1.1.3.2, le mode de clavage en clé de voûte constitue une discontinuité. Ce défaut de construction est susceptible d'évoluer en désordre si les fissures du coulisseau deviennent évolutives. Il est clairement identifiable par la formation de deux fissures longitudinales parallèles qui apparaissent, presque systématiquement, dans tous les tunnels (fig.1-36).

*Figure 1-36 : Fissuration en clé de voute (Goirand, 2012)*

#### *1.1.3.4 Synthèse*

La présentation de la méthode de construction franco-belge nous permet de comprendre comment les défauts de cette technique sont à l'origine des principaux désordres concernant les tunnels en maçonnerie. En effet, pour assurer le bon fonctionnement de ces ouvrages il est nécessaire que :

- La voûte, les piédroits et le radier agissent comme une structure monolithique ;
- Le tunnel, qui n'est pas une structure auto-stable, soit maintenu en compression.

Ainsi :

- La difficulté de clavage - en clé de voûte et au niveau des naissances - représente un point faible vis-à-vis du monolithisme de la structure ;
- L'abandon de boisages en extrados donne lieu à la création de vides à cause de son pourrissement ; la structure n'est donc plus en butée avec le terrain, créant un risque d'absence de compression dans la voûte, donc une mise en péril la stabilité du tunnel ;
- L'absence d'étanchéité permettant la circulation d'eau peut développer la formation de vides en extrados et de fissures dans la maçonnerie.

Dans ces circonstances, les désordres interagissent entre eux, donnant lieu à un cercle vicieux accélérant la dégradation des tunnels maçonnés (cf. Annexe 7)

Un autre inconvénient est la difficulté à voir « ce qui se passe » à l'extrados du tunnel sans employer des techniques de reconnaissance destructives. Heureusement, l'évolution des dégradations des tunnels maçonnés est lente et peut être déterminée au préalable par l'interprétation des symptômes qui se manifestent en intrados du tunnel. On voit donc qu'une bonne connaissance de la méthode de construction est essentielle pour la surveillance des tunnels à partir de simples évaluations visuelles.

### 1.1.4 Les travaux d'entretien des tunnels maçonnés

Afin d'atténuer les défauts associés à la méthode de construction des tunnels maçonnés et aux effets de la dégradation, les trois types principaux de travaux qui se réalisent de manière préventive sont :

- La **régénération**, consistant à injecter du coulis de ciment dans le corps de la maçonnerie pour reconstituer le liant des mortiers, sceller les fissures et réduire la porosité de la maçonnerie. L'objectif est de rétablir le monolithisme et les caractéristiques mécaniques de la maçonnerie, tout en diminuant sa perméabilité.
- Le **collage**. Dans ce cas, les injections de coulis sont réalisées en extrados, dans l'interface de contact entre le terrain encaissant et la maçonnerie, afin de combler les vides produits par le pourrissement du bois de blindage et l'érosion du terrain causée par la circulation d'eau. De cette façon, le contact entre le terrain encaissant et la maçonnerie est rétabli et assure la transmission d'efforts nécessaires pour la stabilité du tunnel.

  Un cas particulier de collage est l'injection sous radier. Les terrains gypseux se dissolvent en contact avec l'eau, créant des vides qui peuvent modifier l'état de contrainte autour de l'ouvrage ou créer des fontis susceptibles d'évoluer jusqu'à atteindre le radier. Dès que ces cavités sont détectées par les sondages de perforation (régulièrement programmés), on procède à leur comblement par injection de coulis ciment.
- La **réfection d'enduits avec pose de drains**. Ce type de travaux consiste, dans un premier temps, en la mise en place d'un réseau de drains (logés dans des saignées réalisées sur la maçonnerie, en forme de patte d'oie) qui permettent la récupération des eaux d'infiltration (fig. 1-37, gauche). Dans un deuxième temps, une couche d'enduit est réalisée par projection du mortier de ciment (fig. 1-37 droite).


*Figure 1-37 : A gauche : système de drains en patte d'oie. A droite : projection du mortier de ciment pour la réfection d'enduits. (Duarte, 2012)*

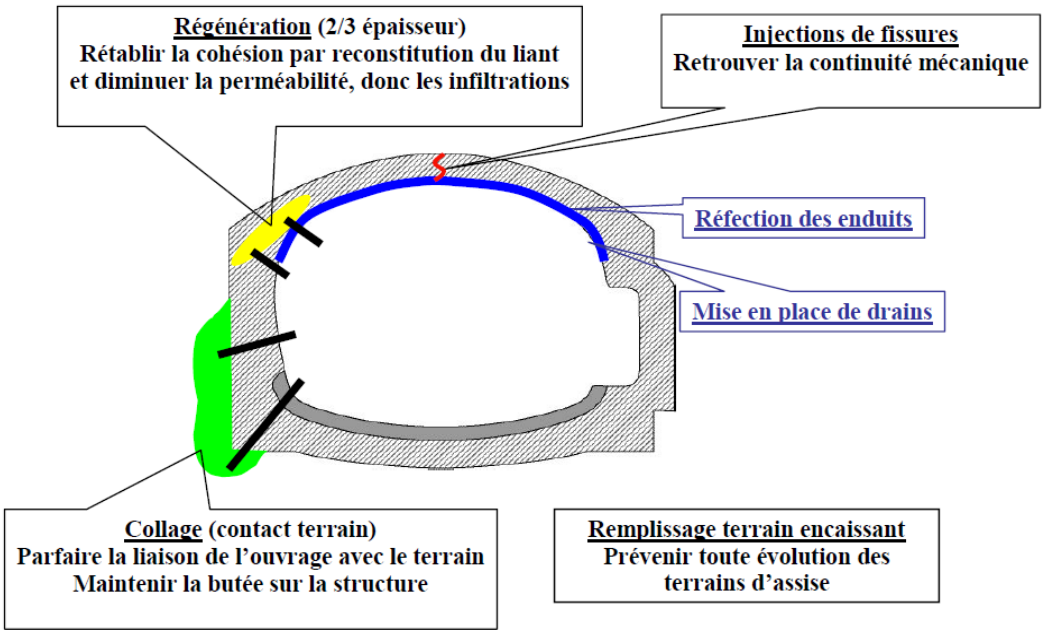



*Figure 1-38 : Synthèse des travaux de maintenance préventive des tunnels maçonnés (Goirand, 2012)*

Ces travaux de maintenance préventive doivent être appliqués sur plus de 210 km de tunnels maçonnés afin d'assurer la sécurité, la capacité de service et la pérennité de ces ouvrages. Cependant les ressources technico-économiques sont, par nature, limitées et les exigences d'exploitation sont de plus en plus contraignantes. Dans ce contexte, il devient nécessaire de programmer les travaux de maintenance.

L'historique de régénérations de maçonnerie réalisées (fig. 1-39) nous montre que les travaux de régénération ont débuté en 1967 à un rythme très faible.

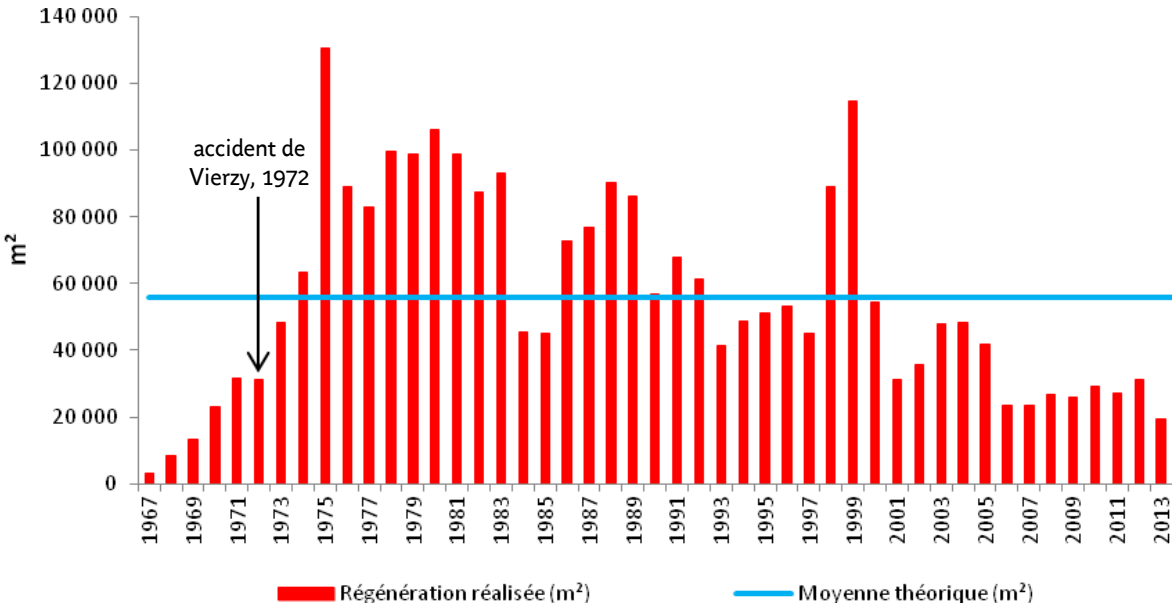



*Figure 1-39 : Historique de régénérations de maçonnerie ($m^2$/an)*

Suite à l'accident de Vierzy en 1972, où l'effondrement d'un tunnel appartenant à la SNCF s'est produit à cause de l'absence d'entretien, un programme pluriannuel de régénération des maçonneries a été instauré. Pendant la période comprise entre 1972 et 1982, on constate une

grande activité de régénération. En outre, l'observation du graphique dans sa globalité nous montre plusieurs pics de régénération, ce qui nous fait douter de l'existence dans les années antérieures d'une programmation basée sur une vision à long terme.

En première analyse, on a déterminé une « moyenne théorique » d'une durée de vie des régénérations de 70 ans (ligne cyan, fig. 1-39). Cette hypothèse se fonde uniquement sur la période d'amortissement prise en compte pour ce type de travaux (Référentiel des biens immobilisés, RATP). Aucun argument technique ou statistique (pas encore suffisamment de retour d'expérience) n'existe à ce jour pour justifier ou contredire cette hypothèse. On peut cependant souligner le besoin d'homogénéisation des rythmes de régénération dans les programmations futures, pour éviter la reproduction de ces pics. En effet, une concentration excessive de travaux sur une même période ne pourrait pas être entreprise, pour des raisons de fonctionnement de l'ensemble du réseau, de capacité de mise en œuvre, ou pour de simples raisons budgétaires.

Une estimation de la durée de vie et des lois de dégradation plus proches de la réalité, tenant compte des différents environnements agressifs, constitueraient déjà une base importante dans la contribution à l'obtention d'un outil d'aide à la programmation plus efficace, avec une vision sur le long terme. Sanchez, (2007), dans sa thèse doctorale pour optimiser la gestion d'un patrimoine autoroutier, indique que « de la fiabilité des lois de dégradation dépende le succès, ou l'échec, d'une politique d'entretien sur le long terme. Une sous-estimation des vitesses de dégradation conduit, sur la durée, à une mauvaise anticipation des budgets nécessaires et des travaux à réaliser, conduisant elle-même à des augmentations des coûts de travaux et des conséquences socio-économiques plus graves sur des états des chaussées dégradés par reports de travaux nécessaires. A l'inverse, une surestimation des vitesses de dégradation des chaussés conduit à un gaspillage de fonds ».

### *1.1.5 Synthèse*

Nous avons présenté les familles d'ouvrages les plus représentatives du patrimoine d'infrastructures de la RATP. Les différents types de structures, les méthodes et les dates de construction, la présence de nombreux ouvrages singuliers sont la preuve de la grande hétérogénéité du patrimoine de la RATP.

Dans ce contexte, et afin de développer une méthodologie d'optimisation de la gestion du patrimoine, nous focaliserons notre recherche sur les tunnels en maçonnerie construits selon la méthode franco-belge ; ce type d'ouvrage est le plus représentatif du réseau en termes de kilomètres. Les résultats obtenus devront ensuite être extrapolés aux autres types d'ouvrages.

Même en se restreignant à ce seul type d'ouvrage, nous sommes toujours confrontés à un patrimoine hétérogène à grand linéaire (plus de 210 km) où chaque ouvrage constitue un cas particulier, soumis à un environnement différent et ayant vécu une histoire de dégradations et de fonctionnement particulière. Il serait utopique de réaliser une étude à l'échelle de l'ouvrage, dans un contexte où l'importance individuelle de chacun est négligeable par rapport à sa contribution au fonctionnement global du réseau. Cela justifie que la gestion du patrimoine soit considérée à l'échelle du « parc d'ouvrages ».

Nous avons présenté la méthode franco-belge pour la construction des tunnels en maçonnerie, et les principales étapes et désordres qui lui sont associés. La plupart de ces ouvrages ont été construits entre 1900 et 1920.

Nous sommes donc confrontés à un parc d'ouvrages hétérogène, ancien et pour lequel les exigences de service ont augmenté par rapport à celles qui avaient été initialement prévues au moment de sa conception. En outre, l'analyse de l'historique des réhabilitations laisse à penser

que l'entretien dispensé dans le passé l'a été sans vision sur le long terme, ce qui n'est pas sans conséquence sur la maintenance à programmer aujourd'hui.

## 1.2 *Politique de maintenance de la RATP : les savoirs, les outils*

### *1.2.1 Généralités*

L'entretien et la surveillance des infrastructures de génie civil au sein de la RATP ont connu plusieurs périodes que l'on peut distinguer comme suit :

- Jusqu'aux années 1960 : entretien courant suite aux visites, aux inspections et aux signalements émis par les différents services d'exploitation et de maintenance. Pendant cette période, la politique de maintenance était principalement corrective, basée sur des opérations ponctuelles d'importance (reconstruction partielle d'ouvrages et chantiers ponctuels d'injection et de régénération) ;
- Dans les années 1960, les grandes opérations de création du RER intra-muros ont permis, à l'occasion des travaux exécutés à proximité des ouvrages du Métro, de constater l'état de l'extrados des maçonneries existantes. Suite à ces constats, les travaux de régénération de maçonneries ont débuté (fig. 1-39) ;
- En 1972, l'effondrement du tunnel de Vierzy (ligne SNCF Paris-Laon dans l'Aisne) marque un point d'inflexion dans les stratégies de maintenance. Le 16 juin 1972, la voûte de ce tunnel s'effondrait, du fait de son très mauvais état et de l'absence d'entretien. L'accident provoqua la collision de deux trains et le bilan humain de cette catastrophe fut très lourd : 108 morts et 111 blessés. En parallèle au groupe de travail mis en place en 1974 au niveau national, suite à cette catastrophe, la RATP émettait le rapport « Entretien des ouvrages souterrains ». Deux ans après, une instruction technique provisoire, définissait de nouvelles règles de surveillance (avec reconnaissances destructives des maçonneries) :
    - Maintenance préventive systématique ;
    - Programme pluriannuel de régénération des maçonneries et de collage au terrain (fig. 1-39).
- À partir des années 1990, en complément des politiques existantes, naît le Schéma Directeur de Maintenance (SDM) qui définit des politiques de maintenance projetées sur des périodes de dix ans (remises à jour régulièrement) ;
- En 2008, une instruction technique propre à l'entreprise, fruit de l'évolution de cinq réglementations internes depuis 1908, voit enfin le jour. Elle s'inspire fortement de l'Instruction Technique du 19 octobre 1979 établie pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art des routes, révisée en 1995.

### *1.2.2 Politique de maintenance actuelle de la RATP*

La politique de maintenance actuelle, dans ses grandes lignes, est principalement une maintenance préventive conditionnelle. Dans ce contexte, les interventions (nombre et type) sont fonction de l'état de dégradation et des résultats d'inspection des ouvrages. Ce type de maintenance préventive requiert des tâches de surveillance additionnelles qui sont au cœur de la procédure de décision.
Comme indiqué dans le CETU (2004) « les évolutions d'un ouvrage sont prévisibles dans la majorité des cas et à des échelles de temps de quelques années ». En effet, une défaillance de l'ouvrage est souvent précédée de signes perceptibles d'évolution tels que les écaillages, fissures,

déformations, infiltrations, etc. Dans ce cas-là, et pour des parcs d'ouvrages à grand linéaire, la surveillance visuelle périodique se présente comme une méthode bien adaptée.

Au sein de la RATP, la politique de surveillance des ouvrages d'art s'articule principalement autour de deux événements :

- Les **visites** qui consistent en un examen visuel et rapide de l'ouvrage, destiné à caractériser l'évolution des désordres relevés lors des inspections détaillées. Leur périodicité est adaptée en fonction de l'importance des pathologies relevées sur les ouvrages.
- Les **inspections détaillées**, d'une périodicité quinquennale, qui sont une étape fondamentale dans la surveillance organisée des ouvrages d'art. Elles permettent d'établir un inventaire détaillé et exhaustif des désordres affectant l'ouvrage, un bilan minutieux de leur évolution et d'attribuer une note de santé caractéristique de l'état structurel de l'ouvrage. Une attention particulière est accordée aux ouvrages établis dans des contextes environnementaux défavorables (remblais compressibles, formations sensibles à la dissolution ou au fluage, zones soumises aux battements de nappe, etc.).

Ces deux actions de surveillance sont fondamentalement basées sur des évaluations visuelles. Les inspections détaillées sont enrichies, en plus, par des actions complémentaires permettant d'établir un diagnostic plus précis des désordres relevés ainsi qu'apporter une meilleure connaissance de l'ouvrage et de son fonctionnement. On distinguera :

- Les reconnaissances destructives, réalisées à partir d'un train de travaux équipé d'un poste de sondage et d'un poste de carottage. Des injections d'essai sont également réalisées. Les carottages permettaient d'évaluer l'état de la maçonnerie, et la définition des priorités sur le programme de régénération et de collage était basée sur ces résultats. Actuellement, ces carottages ne sont plus réalisés de manière systématique mais dans des cas ponctuels où l'évaluation visuelle de l'état de la maçonnerie ne permet pas d'interpréter l'origine des désordres. Ce train de travaux est principalement destiné à réaliser des sondages d'évaluation de la qualité du terrain sous radier et détecter le risque de formation de fontis. Ces sondages se sont intensifiés dans le quart Nord-Est de Paris (soit une cinquantaine de kilomètres de tunnels concernés), zone dans laquelle on trouve des formations gypseuses potentiellement sujettes à dissolution en cas de circulation d'eau. Une équipe disposant de matériel portatif réalise le même travail dans les accès des stations.
- Les reconnaissances non destructives (mesures de courant vagabond, ferroscan, gammagraphie, contrôle de soudures, mesure à impédance mécanique…)
- Les suivis métrologiques. Ils concernent des mesures de nivellement topométrique pour les ouvrages de grande portée (mesure de la flèche) ou des mesures de convergence dans les points d'arrêt des stations du quart Nord-Est Parisien présentant des risques de dissolution de gypse. Des instrumentations (extensomètres, cordes optiques…) sont réalisées au cas par cas pour les ouvrages dont on cherche à comprendre le comportement afin de mieux cibler les travaux à réaliser.

Enfin, des surveillances particulières telles que des inspections détaillées initiales pour les ouvrages neufs ou modifiés, des visites de fin de garantie ou encore des inspections subaquatiques des ouvrages affectés par la Seine peuvent être conduites pour répondre à des besoins spécifiques.

Chaque action de surveillance donne lieu à l'établissement d'un procès verbal validé et enregistré dans la base de données de gestion de la surveillance, MARION (Maintenance Assistée du Réseau, Inspections des Ouvrages et Notations), que nous présentons ci-dessous.

### 1.2.3 Base de données MARION

Selon Delfosse, (2001), pour gérer un patrimoine, il faut tout d'abord le connaître, l'évaluer, planifier les actions de maintenance puis enregistrer toutes les informations relatives à ces actions afin de constituer un historique.

Connaître le patrimoine signifie disposer d'un inventaire précis du parc d'ouvrages à gérer. L'évaluer consiste à déterminer, à l'aide d'indicateurs, l'état, puis la performance des ouvrages à gérer. Finalement, planifier consiste à définir des priorités d'interventions sur les ouvrages selon les objectifs en intégrant les coûts des interventions.

Dans cette optique, la RATP a mis en place en 2003 une base de données informatisée nommée MARION, qui contient le recensement exhaustif de tous les ouvrages composant le patrimoine RATP. A chaque ouvrage est associé l'historique de procès verbaux qui reflètent les résultats des actions de surveillance. Cela permet d'apprécier l'évolution de l'état du patrimoine, de définir le choix de la planification des visites et d'orienter la programmation du gros entretien. Tous les procès verbaux sont rédigés dans leur intégralité sur cet outil informatique. On obtient ainsi des documents standardisés et disponibles à toutes personnes concernées par les activités de la gestion du patrimoine.

#### 1.2.3.1 Notation MARION

Un système de notation est mis en place pour évaluer l'état structurel des ouvrages. Lors d'une activité de surveillance, deux types de notes sont attribués :

- La **note de santé du désordre**. Elle est donnée à chaque désordre de l'ouvrage sur une échelle de 1 à 7 (où 1 représente le cas le plus favorable et 7 le plus grave). Cette note est attribuée à l'échelle du désordre et reflète la gravité de ce désordre par rapport à l'état structurel de l'ouvrage (tab. 1-2).

| Note | Description |
|---|---|
| 1 | **Structure de l'ouvrage en bon état apparent** |
| 2 | **Structure de l'ouvrage en bon état apparent,** mais dont l'entretien courant permettant de le maintenir dans son état de service n'est pas fait |
| 3 | **Structure de l'ouvrage présentant des désordres mineurs,** qui nécessitent un entretien spécialisé sans caractère d'urgence (travaux sur le budget d'exploitation) |
| 4 | **Structure de l'ouvrage présentant des désordres mineurs,** qui doivent être traités rapidement par un entretien spécialisé (travaux sur le budget d'exploitation) **ouvrage dont la structure porteuse altérée,** nécessite des travaux de réparation (travaux sur investissement) à long terme |
| 5 | **Ouvrage dont la structure porteuse est altérée,** nécessite des travaux de réparation à moyen terme |
| 6 | **Ouvrage dont la structure porteuse est altérée**, nécessite des travaux de réparation à court terme :<br>- de l'insuffisance de capacité portante de l'ouvrage ;<br>- du risque d'évolution des désordres à brève échéance ;<br>- de la sécurité des personnes. |
| 7 | **Ouvrage dont la structure porteuse est altérée** rend l'ouvrage impropre à sa destination et pour lequel des restrictions d'utilisation sont définies, voire même une interdiction complète |

*Tableau 1-2 : Echelle des notes de santé du désordre. (IDSOA, 2008)*

Alors que la note de santé du désordre ne donne pas un vue d'ensemble (puisqu'elle est attribuée à l'échelle ponctuelle du désordre), il est donné une seconde note, appelée **note de santé générale.**

- La **note de santé générale** reflète l'état global du lieu (un lieu est un point d'arrêt, l'ensemble des accès au point d'arrêt ou une interstation. Et donc, un lieu peut être composé par un ou plusieurs ouvrages). Elle est déterminée par le nombre de désordres et l'importance de ceux-ci.

| Note générale | Description |
|---|---|
| 1 | Aucun désordre ou désordres en petit nombre avec aucune note supérieure à 3 (dans la structure) sans suite à donner à la surveillance |
| 2 | Désordres en petit nombre avec aucune note supérieure à 4 avec éventuellement et uniquement des travaux spécialisés à faire (budget d'exploitation) |
| 3 | Désordres sans note supérieure à 4 avec éventuellement des travaux spécialisés à faire et des travaux de réparation à long terme (supérieur à 8 ans) |
| 4 | Désordres sans note supérieure à 5 avec éventuellement des travaux spécialisés à faire et des travaux de réparation à moyen terme (de 4 à 8 ans) |
| 5 | Désordres sans note supérieure à 6 avec éventuellement des travaux spécialisés à faire et des travaux de réparation à court terme (de 1 à 4 ans) |
| 6 | Désordres avec note égale à 7 si cela perturbe l'exploitation |

*Tableau 1-3 : Echelles des notes de santé générale (IDSOA, 2008)*

Ces deux notes sont attribuées en tenant en compte uniquement des critères structuraux. Il faut signaler la différence d'échelles entre ces deux notes : la note de santé du désordre est attribuée à l'échelle du désordre, tandis que la note de santé générale est attribuée à l'échelle du lieu.

#### *1.2.3.2 Contenu des Procès Verbaux*

Toutes les activités de surveillance donnent lieu à la rédaction d'un Procès Verbal (PV). Ce document contient une description des caractéristiques du lieu concerné, la note de santé générale, une liste exhaustive des désordres relevés avec la description et la note de santé du désordre de chacun d'eux, et finalement, les suites à donner aux actions de surveillance proposées par les rédacteurs du PV.

#### *1.2.3.3 Exploitation des résultats de la surveillance*

Dans un PV, les Visiteurs d'Ouvrages d'Art ne se limitent pas à refléter l'état structurel des ouvrages. En fonction de leurs critères, ils peuvent suggérer les suites à donner aux activités de surveillance. A partir de là, c'est aux gestionnaires de la RATP de sélectionner celles qui seront finalement exécutées pour assurer le bon état du patrimoine.

Ces différentes suites sont la *dépêche*, la *demande d'intervention urgente (DIU)*, la *proposition de travaux (PTRX)*, la *proposition de gros entretien (PGE)*, la *surveillance réglementaire renforcée (SRR)* et la *demande de préconisation (PE)*.

***Dépêche***

Lors de la surveillance réglementaire, les agents constatent des désordres sur le gros œuvre et sur des équipements dissociables du gros œuvre qui concernent l'entretien courant. La dépêche passée est identifiée par un numéro et inscrite dans le PV MARION.

Des dépêches peuvent également être émises (traitées par les centres de maintenance) pour des mises en sécurité :

- abattage de carrelage pour des surfaces inférieures à 5 m² ;
- mise en place de protection provisoire (plaques, bacs) ;
- petits travaux de maçonnerie, métallerie, plomberie et injection de résine.

***Surveillance Réglementaire Renforcée (SRR)***

Il existe deux types de surveillance réglementaire renforcée :

- **La SRR interne** consiste à établir une surveillance à fréquence plus élevée que la fréquence annuelle. Cette SRR se conclut toujours par la rédaction d'un rapport. Suite à ce rapport une PTRX, une PGE ou une PE (demande de préconisation) peuvent être émises.
- **La SRR externe.** Il s'agit de surveiller l'évolution des désordres avec les moyens topométriques comme par exemple, la surveillance de l'évolution d'une fissure par fissuro-loggeur, glissement de talus par inclinomètre, etc.

***Demande de préconisation (PE)***

Il s'agit d'une demande d'explication suite à un relevé d'anomalie dont l'origine semble provenir d'un dysfonctionnement de la structure ou de l'environnement et pour lequel les visiteurs d'ouvrage ne peuvent statuer avec les éléments visuels ou sonores à leur disposition. Cette demande est adressée aux experts de la gestion patrimoniale : l'équipe I2P et l'Expert Technique.

***Demande d'Intervention Urgente (DIU)***

La demande d'intervention urgente correspond également à une mise en sécurité du site qui est assurée par une entreprise extérieure sous maîtrise d'œuvre de la RATP. Il s'agit d'entretien courant ou parfois d'entretien spécialisé. L'intervention doit avoir lieu dans un délai court fixé par les Visiteurs d'Ouvrage.

Exemples :

- abattage de carrelage sur des surfaces supérieures à 5 $m^2$.
- abattage d'enduits en tunnel
- traitement résine ou pose de drains à caractère sécuritaire

***Proposition de travaux (PTRX)***

La proposition de travaux correspond à un entretien spécialisé dont le montant est suffisamment faible pour être réalisé sur le budget d'exploitation. Le délai d'intervention souhaité est précisé sur la demande. Elles s'orientent plus vers l'entretien courant mais peuvent faire l'objet d'un regroupement pour être traitées dans le cadre de la maintenance améliorative (création de PGE à partir de plusieurs PTRX).

***Proposition de Gros Entretien (PGE)***

La proposition de gros entretien correspond à des travaux importants, qui ne font pas partie de l'entretien courant. La nature de travaux imposent une programmation, soit parce qu'ils sont financièrement lourds, soit parce qu'ils ont un impact sur l'exploitation et les voyageurs.

Une sélection des PGE est réalisée annuellement pour l'élaboration du programme travaux de maintenance des infrastructures ferroviaires.

#### *1.2.3.4 Synthèse*

***Parmi l'ensemble de suites à donner qui peuvent être proposées par les visiteurs d'ouvrages d'art, la dépêche, la surveillance réglementaire renforcée et la demande de préconisation sont considérées comme des activités liées aux actions de surveillance et diagnostic.***

***Pour celles qui supposent une réalisation de travaux, la demande d'intervention urgente (DIU) concerne les travaux d'intervention à court terme ; ils sont considérés comme des aléas et ce type de demande ne peut pas faire partie d'une programmation de travaux dû à son caractère d'urgence. Dans cette situation, la proposition de travaux (PTRX) et la proposition de gros entretien (PGE) sont les seules suites qui peuvent faire partie d'une programmation de travaux et donc, être l'objet de cette étude.***

### *1.2.4 Données disponibles pour configurer les plans de maintenance*

Outre l'historique des PV, dans la base de données MARION, il est associé à chaque ouvrage une fiche technique qui contient la date de construction, la description technique et plans des ouvrages, ainsi qu'une description hydrogéologique du terrain encaissant.

D'autres informations utiles pour la gestion sont localisées dans d'autres bases de données comme l'historique de travaux de réhabilitation suivis par l'ouvrage, ou les résultats des carottages ou d'autres méthodes d'évaluation destructive.

Ces informations sont de caractère technique et sont disponibles pour tous les intervenants dans la gestion du patrimoine.

### *1.2.5 Le processus décisionnel chez la RATP*

La RATP, est l'exploitant et gestionnaire d'infrastructures des 14 lignes de métro parisien et 2 lignes de RER et, à ce titre, elle se doit d'assurer la sécurité et la pérennité de ses ouvrages. L'entité Contrôle du Patrimoine et Maîtrise d'Ouvrage (CPMO) est chargée d'assurer la surveillance du patrimoine, à savoir, les inspections détaillées, les visites, la définition du programme d'entretien des ouvrages et les mesures conservatoires urgentes.

Pour cela, elle :

- réalise la surveillance des ouvrages d'art en exploitation du patrimoine ferroviaire ;
- préconise les travaux nécessaires accompagnés de leur évaluation et suit les opérations de gros entretien ;
- instruit les projets internes et externes pour l'ensemble de l'entreprise en apportant les réponses aux demandes de renseignements, permis de construire, dossiers d'urbanisme, etc. ;
- émet des avis sur l'impact, la maintenabilité et la visitabilité des projets internes, et des prescriptions techniques relatives à l'exécution de construction ou de travaux de voisinage des infrastructures ;
- participe à la politique d'entretien des infrastructures ferroviaires (Schéma Directeur de la Maintenance – Coordination des opérations d'entretien et des travaux de rénovation).

Ces missions sont réparties entre les groupes : Visites et Inspections (VI), Investigations, Préconisations et Projets (I2P), Instructions des Projets Extérieurs (IPE) et l'Expert Technique.

#### *1.2.5.1 La surveillance des ouvrages d'art*

Comme il est spécifié dans son cahier des charges, approuvé par décret n°75-470 du 4 Juin 1975, la RATP est totalement responsable de la surveillance et de l'entretien de ses ouvrages, avec l'obligation d'aviser la Direction Régionale de l'Equipement d'Ile de France des anomalies pouvant mettre en cause la sécurité des circulations.

Dès l'origine, la surveillance du patrimoine des infrastructures ferroviaires en exploitation a été encadrée par la réglementation. Depuis la première instruction, datant de 1908, plusieurs actualisations ont eu lieu pour s'adapter à l'évolution de la réglementation et l'accroissement du réseau de transport de la RATP. Depuis 2008, la surveillance du patrimoine des infrastructures ferroviaires en exploitation est soumise à l'Instruction Générale sur la Surveillance des Ouvrages Ferroviaires (IDSOA, 2008). Cette instruction est dérivée de l'Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art (ITSEOA) qui est la réglementation en vigueur pour le réseau routier national et la gestion de son patrimoine d'ouvrages d'art.

L'IDSOA, propre à la RATP, définit les modalités de surveillance des ouvrages d'art. Devant donner une juste idée de l'état du patrimoine permettant de prévoir les opérations d'entretien nécessaires, elle s'exerce à la fois de façon continue et périodique. La surveillance continue repose sur les signalements d'anomalies constatées par les agents utilisant les installations ; la surveillance périodique s'effectue par des inspections détaillées et visites réalisées par l'équipe de Visites et Inspections (VI) (fig. 1-41).

Les **inspections détaillées**, d'une fréquence quinquennale, sont une étape fondamentale dans la surveillance organisée des ouvrages d'art. Elles permettent d'établir un constat exhaustif sur un ouvrage à un moment donné, et constitue en quelque sorte un « bilan de santé ». L'inspection détaillée comporte l'examen minutieux de toutes les parties de l'ouvrage. Ainsi, en plus de l'examen visuel, des contrôles spécifiques et des essais peuvent être effectués pour fournir des renseignements complémentaires.

Une attention particulière est accordée aux ouvrages qui sont situés dans des zones où l'environnement est défavorable, notamment à cause des conditions géologiques ou hydrogéologiques, ainsi qu'aux ouvrages dont le mode de construction a induit, par vieillissement ou dégradation, des problèmes susceptibles de nuire à l'exploitation.

La programmation des inspections détaillées est établie par le responsable du groupe VI. Tous les ouvrages doivent être soumis à une inspection détaillée, au moins une fois tous les cinq ans. Eventuellement, tous les ouvrages devant subir des travaux de gros entretien ou de réfection, mettant à nu des parties cachées du gros œuvre, devront faire à cette occasion l'objet d'une inspection détaillée. Par conséquent, les entités Travaux sont tenues, lors de la réalisation d'opérations de ce type, d'informer au préalable le responsable de VI et de mettre à sa disposition, si nécessaire, les moyens humains et matériels, afin que celui-ci puisse procéder à la dite inspection détaillée.

Les **visites** consistent en un examen visuel et rapide de l'ouvrage permettant de déceler l'évolution significative des désordres préalablement relevés et de mettre en évidence de nouveaux désordres graves.

Sa programmation doit être établie selon une périodicité telle que la détection d'une dégradation soit faite avant que cette dernière présente un caractère de gravité pouvant porter atteinte à la sécurité des personnes ou à la stabilité de l'ouvrage. La détermination de la périodicité doit obéir au double souci de minimiser les risques, vis à vis des voyageurs, et d'efficacité de gestion. Elle est définie en fonction des propositions des Visiteurs d'Ouvrages d'Art et le responsable de VI peut les valider ou les modifier en fonction des remises à jour, suite à des données nouvelles (travaux et réparations effectués récemment, événements extérieurs

modifiant l'environnement de l'ouvrage ou pouvant entraîner des dégradations, etc.). En moyenne, un ouvrage est objet d'une visite tous les deux ans. Dans tous les cas, l'expert ou le responsable de l'entité doivent être préalablement consultés pour valider ces modifications éventuelles.

Les inspections détaillées et les visites peuvent se compléter par les **études complémentaires**, dans les cas où les observations visuelles ne s'avèrent pas suffisantes pour évaluer l'état structurel de l'ouvrage (tel est le cas des visites des parties immergées, par exemple) ou quand l'examen de la structure n'a pas permis d'expliquer les causes exactes des désordres.

On peut distinguer les reconnaissances destructives et non destructives, et les suivis métrologiques. Dans ce cas, l'équipe de VI peut demander la collaboration d'I2P pour préconiser une campagne de reconnaissances destructives des maçonneries ou la mise en surveillance renforcée des ouvrages, par exemple. Egalement, la collaboration de l'Expert Technique peut être sollicitée pour établir un diagnostic plus précis des désordres les plus complexes, ainsi que pour apporter une meilleure connaissance du fonctionnement des ouvrages situés dans les environnements défavorables (fig. 1-41).

Ce type d'études est appliqué au cas par cas et dans des situations particulières et l'information obtenue est de caractère ponctuel. C'est pour cela que cette information n'est pas extrapolable à la globalité du patrimoine.

#### *1.2.5.2 Exploitation des Procès Verbaux MARION*

Les résultats des activités de surveillance donnent lieu à l'établissement d'un procès verbal rédigé par les Visiteurs d'Ouvrages d'Art et validés par le responsable de VI. Tous les procès verbaux sont enregistrés dans la base de données informatique MARION (§ 1.2.3).

Suite à l'analyse des PV contenant le bilan de santé et la notation des ouvrages, l'équipe de VI peut proposer différentes suites. Celles concernant notre étude sont (fig. 1-41) :

- Pas de Proposition de Travaux. Dans ce cas, l'ouvrage concerné sera soumis à la surveillance périodique normale.
- Proposition de Travaux (PTRX). Ce type de travaux correspond à un entretien spécialisé dont le montant est suffisamment faible pour être réalisé sur le budget d'exploitation. Si la PTRX n'est pas prise en charge, l'ouvrage sera surveillé de façon normale. Dans le cas contraire, les travaux sont pris en charge par l'entité Maintenance et Entretien des Espaces (M2E) dont le budget est complètement indépendant de celui de l'entité CPMO. C'est pour cela que ce type de travaux ne fera pas partie de notre étude. Une troisième possibilité est le regroupement de plusieurs PTRX de la même nature pour créer un Proposition de Gros Entretien.
- Proposition de Gros Entretien (PGE). Cette proposition concerne des travaux qui sont financièrement lourds et qui peuvent avoir un impact sur l'exploitation et donc, les travaux de ce type doivent être programmés. Les PGE et les lignes directrices définies par le Schéma Directeur de la Maintenance sont le point de départ pour l'élaboration du programme de maintenance.

#### *1.2.5.3 Le Schéma Directeur de la Maintenance (SDM)*

Le SDM a pour objectif de définir, à partir d'une perspective de « risque », la stratégie de maintenance patrimoniale à mener sur les infrastructures ferroviaires. Sa conception est définie à 10 ans, ce qui permet d'avoir une vision de la gestion sur le moyen terme.

Le SDM est composé d'un ensemble de fiches qui peuvent être considérées comme une capitalisation et une synthèse des pathologies rencontrées sur le réseau, des zones qui sont affectées et d'une analyse du risque. Chaque fiche prévoit une politique de maintenance avec le traitement associé à chaque désordre, suivi d'une synthèse financière des investissements à prévoir.

La rédaction et la mise à jour du SDM sont basées sur les connaissances et l'expérience des experts de VI, I2P, Pilotage Investissement et l'Expert Technique (fig. 1-41).

#### *1.2.5.4 Choix et hiérarchisation des PGE*

L'équipe Pilotage d'Investissements (PI) est chargée de l'élaboration du programme de maintenance patrimoniale. L'objectif est d'obtenir le meilleur état structurel et de performance du patrimoine à partir des ressources technico-économiques disponibles. Mais cette mission devient complexe au moment où ces ressources sont limitées et les contraintes associées à la gestion du patrimoine de plus en plus sévères.

Dans ce contexte, il est nécessaire de choisir et hiérarchiser les PGE qui feront partie du programme de travaux (les PGE refusées sont soumises à surveillance périodique). L'équipe PI peut compter sur la collaboration transversale de VI et I2P qui apportent une vision technique sur la faisabilité des travaux (fig. 1-41).

A cette étape, les données disponibles proviennent principalement des PV MARION et donc l'information est fondamentalement de caractère technique. Mais la prise de décision a besoin de plus d'informations de différente nature et actuellement elle se réalise selon les critères suivants (fig. 1-40) :

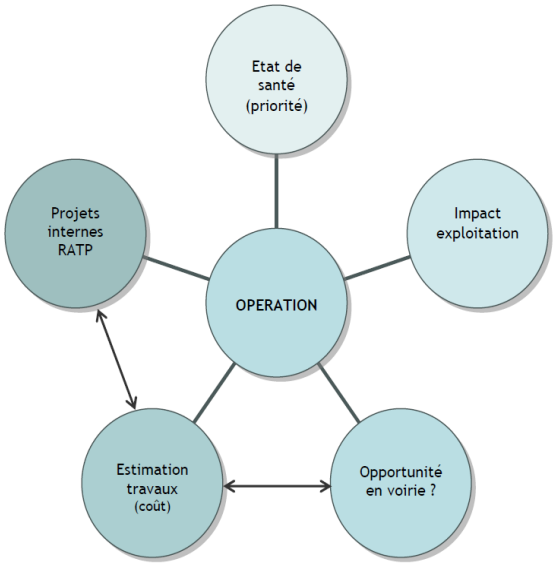



*Figure 1-40 : Critères de décision pour la définition du programme de maintenance (Duarte, 2012)*

Ces informations complémentaires ne sont pas centralisées dans MARION et sont dispersées dans d'autres bases de données, ce qui peut donner lieu à des imprécisions.

***En outre, actuellement il n'y a pas de méthodologie établie permettant de considérer ces critères de décision d'une manière optimisée. Ce processus est basé sur l'expertise et n'est pas formalisé, ce qui provoque un manque de transparence ou « effet de boîte noire » du processus décisionnel. Dans ce cas, les arguments utilisés dans la prise de décisions semblent ne pas être assez solides, comme par exemple, la justification des travaux préventifs dont le report d'une, voire de plusieurs années, ne semble pas entraîner de conséquences visibles en terme de dégradation. En plus, la non-formalisation du processus décisionnel est un inconvénient vis-à-vis de la transmission du savoir-faire entre les différentes générations de gestionnaires.***

***C'est dans cette phase du processus décisionnel que s'inscrit notre recherche (fig. 1-41), afin de répondre à une volonté de transparence dans les décisions et de justification de la logique décisionnelle.***

#### *1.2.5.5 Préconisation, exécution et réception de travaux*

Une fois le programme de maintenance défini, l'équipe I2P et l'Expert Technique préconisent les travaux à réaliser et émettent des avis sur leur faisabilité et leur impact. La surveillance de ces travaux de gros entretien est assurée par I2P. Une fois terminés, une inspection détaillée initiale doit être réalisée par VI et I2P avant la réception d'un ouvrage (fig. 1-41).

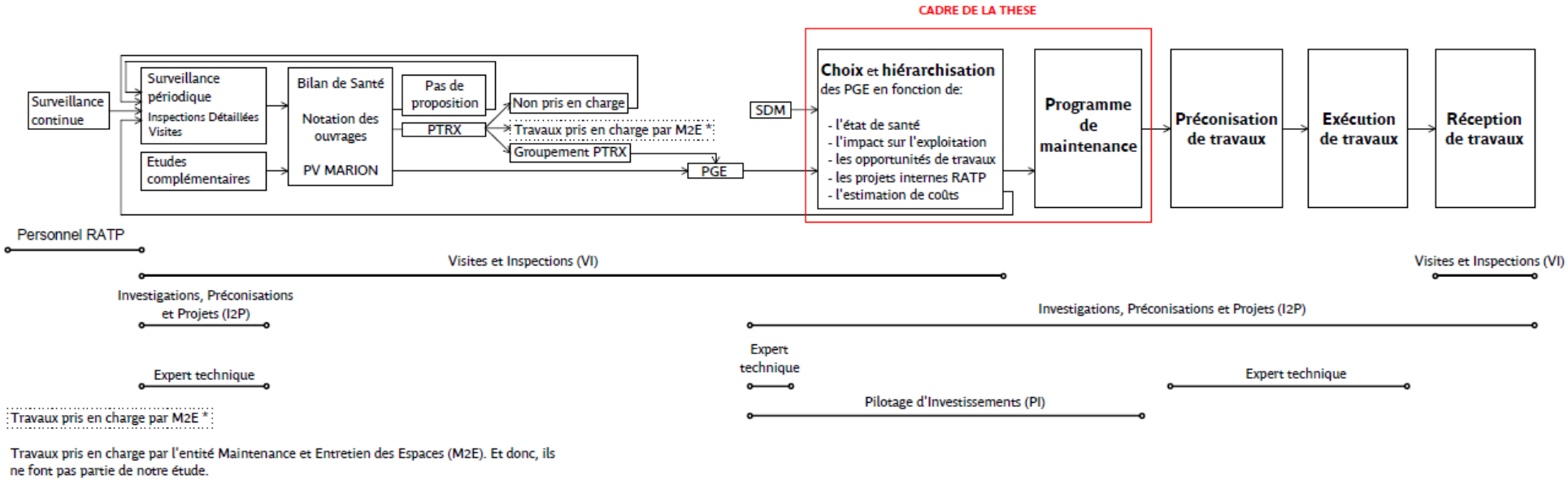



*Figure 1-41 : Schéma fonctionnel du processus décisionnel de la gestion du patrimoine de l'entité CPMO*

### *1.2.6 Synthèse*

L'implantation de la base de données MARION, comme le système de notation actuel, ont été réalisés en 2003. Naturellement, il a fallu une période de rodage pour que tous les intervenants dans la gestion du patrimoine RATP s'adaptent à ce nouvel outil. Dans ce contexte, on peut considérer que la contribution de MARION a commencé à être fiable à partir de 2008.

Avant MARION, l'information concernant l'historique des ouvrages était très dispersée et, logiquement, pour les ouvrages les plus anciens, de plus d'un siècle de vie, la qualité de l'information disponible n'est pas la meilleure.

Les Procès Verbaux reflètent les résultats des visites périodiques et inspections détaillées. Ces activités de surveillance sont principalement visuelles et donc ces résultats ont une variabilité qui dépend des critères personnels de chaque visiteur d'ouvrages. En particulier pour les *notes de santé du désordre* et la *note de santé générale du lieu* pour lesquelles, dans un contexte d'inspections visuelles, les frontières entre les différentes notes de 1 à 7 ne sont pas bien délimitées et sont soumises à l'interprétation personnelle de chaque visiteur.

Des résultats d'évaluation plus précis, obtenus par méthodes d'inspection destructive (carottage de la maçonnerie, par exemple), instrumentations (extensomètres, cordes optiques…), mesures de nivellement topométrique, etc., sont réalisées au cas par cas et ces résultats ne peuvent pas être extrapolés pour la globalité du patrimoine.

***L'analyse du processus décisionnel à la RATP montre que le PV MARION est le principal support de transmission d'information entre les différents intervenants de la gestion. La qualité de ce document est donc essentielle et, en raison des limites mentionnées ci-dessus, il y a un réel intérêt à formaliser son interprétation, afin d'exploiter au maximum l'information contenue dans ces PV qui constitue la principale source de données pour la phase de prise de décisions.***

***Cette information technique provenant des PV MARION est ensuite complétée par le reste des critères de différente nature, employés par PI pour définir le programme de maintenance. Actuellement, il n'existe pas une méthode multicritère formalisée et la prise de décisions est basée sur l'expertise. Cette absence de méthodologie donne lieu à un manque de transparence du processus de décision et de vision sur le long terme.***

***Il est donc fondamental de considérer ces facteurs pour fournir aux gestionnaires du patrimoine d'infrastructures de la RATP des méthodes et des outils adaptés pour définir une stratégie de maintenance assurant la sécurité, la capacité de service et la pérennité du patrimoine. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre recherche.***

## 1.3 *Objectifs et besoins : justification de la recherche*

La RATP, en sa qualité de gestionnaire de patrimoine, est confrontée :

- Au vieillissement des infrastructures : elle doit garantir un niveau de qualité et de service élevé en termes de sécurité et de confort pour les voyageurs et assurer la pérennité des ouvrages ;
- A l'hétérogénéité du patrimoine : différents types d'ouvrages et de méthodes de construction, diversité d'environnements agressifs, etc. ;
- A une grande quantité d'informations : de nombreux PV, d'historiques de travaux, etc. qui sont régulièrement mis à jour ;

- A la multiplicité des données : les différents éléments composant le patrimoine, les opérations (d'entretien, de réparation ou de mise à niveau) effectuées, les anomalies détectées, les conditions d'exploitation, les caractéristiques d'un environnement urbain très dense, etc.

Conformément à ce que nous avons décrit, la gestion du patrimoine est un problème complexe qui induit de nombreuses décisions dans un contexte multicritère : multiplicité des enjeux en termes de gestion et de performance (sécurité, fiabilité, disponibilité, durée de vie). Le gestionnaire doit prendre en compte plusieurs aspects dans la décision : la réglementation en vigueur, l'impact sur la sécurité des usagers et le coût de l'opération, la limitation des ressources disponibles, le tout dans un contexte sociétal évolutif.

Dans ce cadre, la RATP a décidé de formaliser et d'améliorer le processus décisionnel pour la maintenance préventive et la gestion de son patrimoine d'infrastructures. ***Pour ce faire, l'objectif de cette recherche est de proposer un outil d'aide à la décision multicritère, capable d'argumenter et de justifier une configuration optimisée des programmes de maintenance.***

Cet outil doit permettre :

- L'optimisation des ressources disponibles pour obtenir le meilleur état structurel et de performance de l'ensemble du patrimoine à partir de budgets limités.
- La justification des besoins budgétaires dans le contexte d'un patrimoine vieillissant où une gestion inadaptée pourrait entraîner une augmentation des coûts de maintenance ou mettre en péril la pérennité des ouvrages.
- La justification des travaux préventifs. Les bénéfices des travaux préventifs sont difficilement perceptibles à court terme. Il est donc nécessaire de les rendre visibles et quantifiables.
- La définition des programmes pluriannuels pouvant intégrer les différentes échéances temporelles possibles : de l'urgence à la planification à long terme.

Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire de pouvoir :

- Réduire la variabilité des données, issues des inspections visuelles, qui interviennent dans la définition du programme de travaux.
- Centraliser les informations intervenant dans les différentes phases de la gestion, facilitant le partage et la disponibilité des données pour tous les acteurs concernés par la gestion du patrimoine.
- Formaliser l'interprétation des données présentes dans les PV pour améliorer la qualité de l'information utilisée lors des prises de décisions.
- Tenir compte de l'ensemble de contraintes économiques et sociales concernant la gestion du patrimoine et les formaliser sous la forme de critères de décision pour pouvoir les intégrer dans un outil multicritère d'aide à la décision.
- Formaliser l'expertise afin de rendre les arguments plus transparents et renforcer la logique décisionnelle, et assurer la transmission du savoir-faire entre les différentes générations de gestionnaires.
- Quantifier les bénéfices associés aux travaux de maintenance pour pouvoir comparer, a priori, différentes stratégies de travaux d'un point de vue technico-économique.
- Améliorer la vision sur le long terme de l'évolution de l'état structurel des ouvrages, permettant de prévoir l'impact d'une programmation de travaux sur les programmations futures en termes techniques et financiers.

- Améliorer la vision globale à l'échelle du patrimoine : son état structurel et de performance, les priorités d'intervention, les objectifs et les contraintes dans un contexte d'exploitation en évolution constante.

# Chapitre 2. Les méthodes et outils de la gestion patrimoniale

Dans ce chapitre, nous définissons les concepts de la gestion des ouvrages de génie civil (système de génie civil, maintenance, analyse de risque et diagnostic). Nous présentons les caractéristiques de la gestion patrimoniale et les objectifs à atteindre. Ensuite, les enjeux principaux des infrastructures de transport seront introduits. Enfin, afin d'obtenir une vision globale de l'état de l'art de la gestion du patrimoine, nous synthétiserons les différents modes de gestion développés dans le domaine industriel, du génie civil et des infrastructures des transports.

## 2.1 *Les différents concepts de la gestion du patrimoine*

### *2.1.1 Système de génie civil et performance – définitions et principes*

Un ***système de génie civil*** (un ouvrage ou un ensemble d'ouvrages) se définit, d'une part à partir des éléments structurels (ou des sous-systèmes) qui le composent, d'autre part à partir des fonctions qu'il accomplit. A chaque niveau de décomposition du système, ces éléments structurels, ou composants, remplissent à leur tour des fonctions qui contribuent à la réalisation des fonctions globales de l'infrastructure (fig. 2-1).

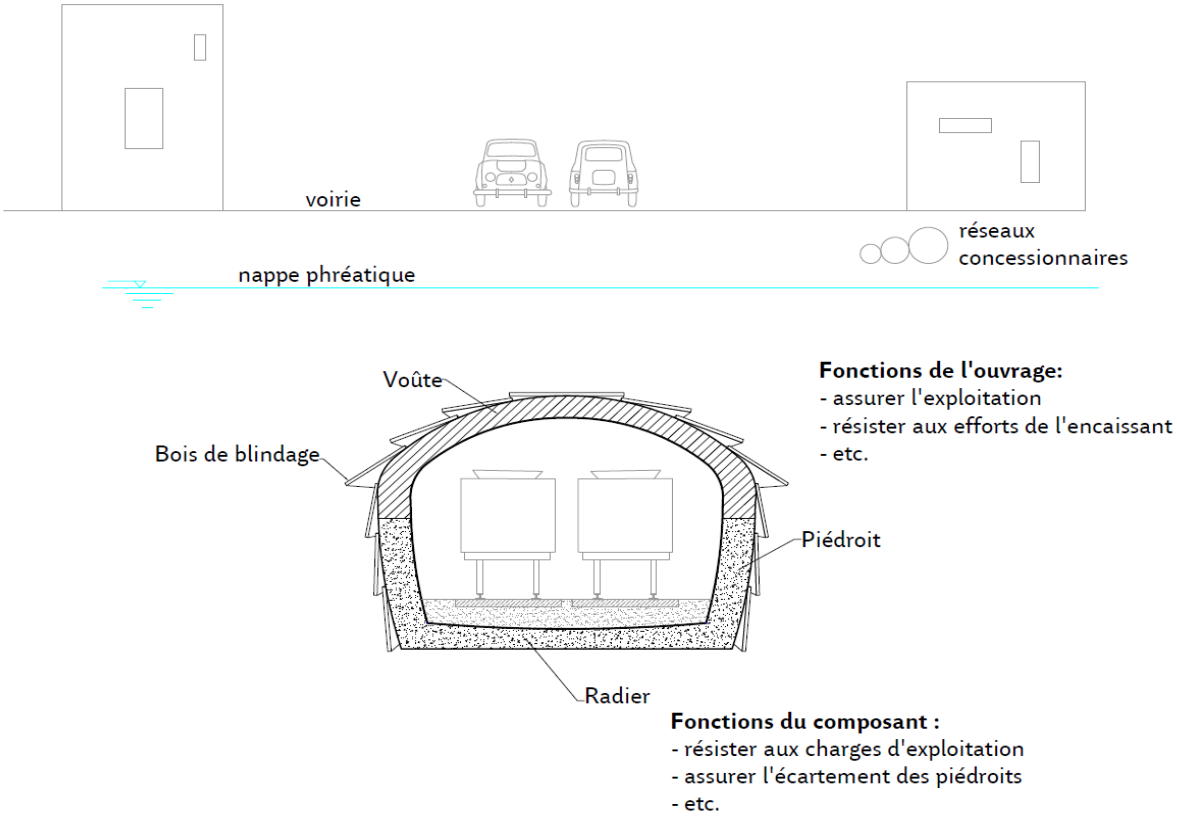



*Figure 2-1: Eléments et fonctions d'un système de génie civil particulier : tunnel en maçonnerie*

Ainsi, deux types d'analyse permettent de définir un système de génie civil : structurelle et fonctionnelle (Cremona, 2003). Ces deux analyses seront détaillées dans la suite du document (Chapitre 6).

La ***performance*** est l'aptitude d'une structure à remplir les fonctions pour lesquelles elle a été conçue. Les performances d'un système de génie civil sont amenées à évoluer durant sa vie : les fonctions initialement prévues lors de la construction peuvent être modifiées volontairement par le gestionnaire (tel peut être le cas du patrimoine RATP en raison de l'évolution des exigences de l'exploitation) ou encore par des événements extérieurs (des dégradations peuvent perturber les fonctions initiales). Trois principales causes peuvent provoquer les pertes de performances (Cremona, 2003) :

- Le vieillissement de l'infrastructure ;
- Les causes humaines s'exerçant par erreur ;
- Les causes extérieures prévues ou imprévues.

On considère deux catégories de perte de performance (fig. 2-2) :

- La ***dégradation*** qui est une diminution de la performance d'une fonction restant néanmoins supérieure au seuil fonctionnel ou à l'état-limite (état ou phénomène que l'on souhaite éviter) (Cremona, 2003) ;
- La ***défaillance*** qui est l'altération ou la cession de l'aptitude d'un système à accomplir sa ou (ses) fonction(s) requise(s) avec les performances définies dans les spécifications techniques (norme NF X60-010). Dans ce cas, une au moins des performances est inférieure au seuil fonctionnel.

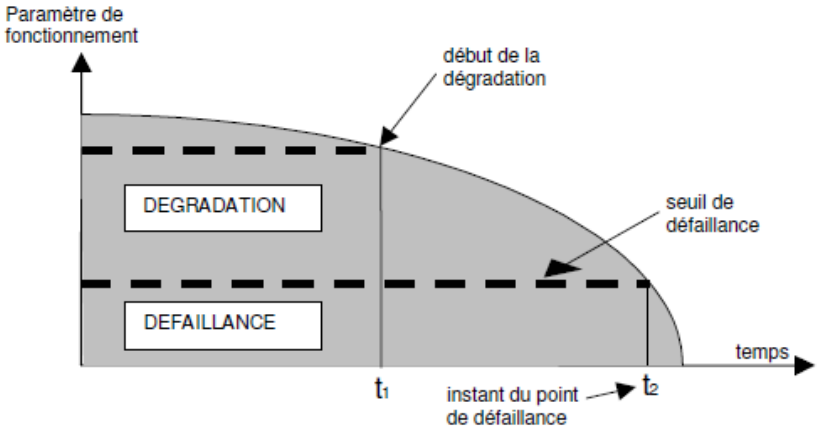



*Figure 2-2: Dégradation et défaillance (Zwingelstein, 1996)*

***L'évaluation de la performance d'un ouvrage de génie civil*** en service comprend une évaluation de son état, puis une évaluation de sa performance (Cremona, 2003). L'évaluation de l'état est une étape d'analyse où les dégradations de l'ouvrage et leur histoire sont recherchées; la qualité des informations disponibles sur la structure y est fondamentale. L'évaluation de la performance est ensuite réalisée comme dans le cadre d'une phase de conception, mais en se basant sur l'état structurel réel de l'ouvrage en cours d'exploitation.

### *2.1.2 La maintenance des systèmes de génie civil*

La ***maintenance*** comprend « toutes les activités destinées à maintenir ou rétablir un système dans un état ou dans des conditions données de Sûreté de Fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management » (norme NF X60-010).
En fonction du type de structure et de la politique d'exploitation des ouvrages, on rencontre deux principales stratégies de maintenance pouvant s'appliquer aux ouvrages : corrective et préventive, dont les détails apparaissent à la figure 2-3.

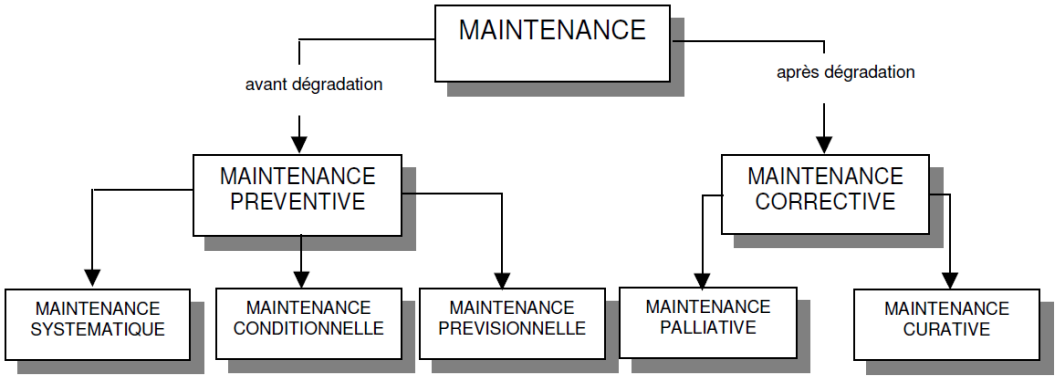



*Figure 2-3: Les stratégies de maintenance (Zwingelstein, 1996)*

La maintenance préventive va chercher à anticiper les pertes de performance au moyen d'un suivi rapproché de l'état de l'ouvrage et à apporter les mesures correctives avant la défaillance. Elle est appliquée pour les ouvrages présentant des risques forts (comme par exemple, la rupture d'un barrage) et si les coûts induits par la perte de performance sont élevés par rapport aux coûts de réparation et d'inspection. On distingue alors la maintenance systématique, la maintenance conditionnelle et la maintenance prévisionnelle.

- Dans le cadre d'une ***maintenance systématique***, les actions sont régulièrement effectuées quel que soit l'état de l'élément. Ce type de maintenance permet d'éviter les dépenses en activités de surveillance. Ce n'est recommandable que pour les composants dont on connaît de façon très précise leur durée de vie moyenne ou lorsque des contraintes réglementaires ou juridiques (clauses de garantie) sont obligatoires. Elle peut conduire à des coûts élevés, car on n'arrive pas à optimiser la durée de vie des composants, mais réduit le risque de perturbation dans le service de l'infrastructure.
- Dans le contexte d'une ***maintenance conditionnelle***, les interventions (nombre et type) sont fonction de l'état de dégradation et des résultats d'inspection. Ce type de maintenance préventive requiert des tâches de surveillance additionnelles qui sont au cœur de la procédure de décision, bien que la plupart d'entre elles soient effectuées selon une programmation régulière.
- La ***maintenance prévisionnelle*** (ou prédictive) est subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien, permettant de retarder et de planifier les interventions.

A contrario, la maintenance corrective intervient après le constat de la défaillance ou de la dégradation et est mise en œuvre dans des contextes où l'enjeu est plus limité. Deux types de maintenance corrective sont possibles :

- La ***maintenance palliative*** est destinée à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise. Appelée couramment dépannage, elle est principalement constituée d'actions à caractère provisoire qui devront être suivies d'actions curatives.
- La ***maintenance curative*** a pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise. Le résultat des activités réalisées doit présenter un caractère permanent. Ces activités peuvent être des réparations, des modifications ou aménagements ayant pour objet de supprimer les défaillances.

Chaque catégorie de maintenance comprend un domaine privilégié correspondant à un optimum en vue d'atteindre des niveaux de fiabilité et de sûreté tout en minimisant les coûts de

maintenance. Savoir identifier le type de maintenance le plus adéquat peut être une source d'optimisation de la gestion du patrimoine (Zwingelstein, 1996). Ce choix doit être fait à partir des caractéristiques des fonctions à maintenir et des modes de défaillances qui leur sont associés.

## 2.2 *Analyse de risque et diagnostic dans la gestion du patrimoine*

La ***Sûreté de Fonctionnement*** est « la Science des Défaillances, incluant leur connaissance, leur évaluation, leur prévision et leur maîtrise » (Villemeur, 1988). Elle propose depuis de nombreuses années dans le milieu industriel des méthodes pour identifier, analyser, gérer et réduire les risques (Peyras, 2003). Ces méthodes vont permettre de réaliser le diagnostic, évaluer l'état, analyser la sûreté et les risques de défaillance d'un système. Des exemples d'applications de ces méthodes dans le contexte des ouvrages de génie civil sont de plus en plus nombreux (Serre, 2005).

Le ***diagnostic*** d'un ouvrage est « l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test » (AFNOR, 2001). On recherche dans le passé de l'ouvrage sur lequel on produit le diagnostic les mécanismes de dégradation qui ont conduit à son état actuel au moment de son évaluation.

L'évaluation de l'***état*** d'un ouvrage consiste à déterminer, à un instant donné de sa vie (généralement à l'instant présent), sa condition structurelle (l'état des dégradations). La recherche des conditions de réalisation des fonctions de l'ouvrage est l'étape suivante qui vise alors à évaluer sa *performance*.

Le ***risque*** est « une mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences » (Villemeur, 1988).

Pour un gestionnaire du patrimoine, analyser les risques que présente son parc d'ouvrages est primordial pour adapter les actions de maintenance à entreprendre. L'analyse de risques est l'activité qui consiste à répondre aux trois questions suivantes (Kaplan, 1997) :

- Qu'est-ce qui peut conduire à des situations de danger ?
- Quelles sont les chances que ces situations se produisent ?
- Si elles se produisent, à quelles conséquences doit-on s'attendre ?

Dans une étude d'analyse de risques d'un ouvrage, on cherche donc à évaluer sa Sûreté de Fonctionnement (deuxième question dans la liste proposée par Kaplan). La ***Sûreté de Fonctionnement*** correspond à l'aptitude d'une entité à accomplir une ou plusieurs fonctions requises, dans des conditions données. Elle est caractérisée par différents concepts, notamment la fiabilité et la durabilité, définis par la norme (AFNOR, 1988) :

- La ***fiabilité***, qui correspond à l'aptitude de l'ouvrage à assurer ses fonctions, dans des conditions données, pendant une période de temps donnée ;
- La ***durabilité***, qui correspond à l'aptitude à demeurer en état d'accomplir ses fonctions, dans des conditions données d'utilisation et de maintenance, jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint.

Pour établir le diagnostic d'un ouvrage de génie civil, évaluer son état et sa performance, ou analyser les risques et évaluer sa Sûreté de Fonctionnement, deux familles d'approche sont possibles (Peyras et *al.*, 2004), (Zwingelstein, 1995) : les méthodes internes et les méthodes externes.

Les ***méthodes internes*** reposent sur la connaissance approfondie du système étudié (un ensemble de composants interconnectés dans l'industrie, un ouvrage de génie civil). A partir de modélisations, il est alors possible d'analyser les mécanismes de dégradation et de rupture, de prévoir le comportement futur. Selon le type de modèle décrivant le système, on distingue deux types de modélisation :

- La ***modélisation physique***, qui repose sur la représentation physique des processus continus ou discrets de dégradation du système, en prenant en compte les équations régissant les phénomènes internes. Elle implique une connaissance approfondie du système et de sa représentation sous la forme de modèles physiques et mathématiques, appuyés par la simulation numérique. Il convient de disposer des lois de comportement physique du système et de données abondantes sur les ouvrages modélisés.
- La ***modélisation fonctionnelle***, qui étudie les systèmes sous l'angle des fonctions qu'ils doivent remplir et pour lesquelles ils sont conçus. Le principe de la modélisation fonctionnelle consiste à déterminer les interactions entre les composants d'un système et son environnement, de façon à établir de manière formelle les liens entre les défaillances des fonctions, leurs causes et leurs effets. Une fois le modèle de fonctionnement établi, on cherche à évaluer des mesures de Sûreté de Fonctionnement qui peuvent être, selon le contexte et les données disponibles, déterministes ou probabilistes.

Les ***méthodes externes*** s'appliquent dans des contextes où la modélisation des mécanismes (physiques ou fonctionnels) n'est techniquement pas possible ou pas adaptée au niveau de préoccupation, compte tenu de sa complexité ou de son coût. En fonction des informations disponibles, on distingue deux familles de méthodes :

- L'***analyse statistique***. Cette approche nécessite un retour d'expérience riche et parfaitement documenté, ce qui peut être le cas dans des parcs d'ouvrages homogènes ou pour les systèmes disposant de mesures abondantes et précises. Les méthodes statistiques appliquées aux données du retour d'expérience (données statistiques au sein d'un parc homogène ou série de mesures chronologiques attachées à un système) permettent d'établir des corrélations entre les défaillances du système et d'anticiper ensuite ces comportements.
- L'***expertise et système expert.*** En présence d'un nombre réduit (voir unique) d'ouvrages et en absence de modèles de comportements, l'expert humain est le seul potentiellement capable de prévoir l'évolution d'un système. L'expertise revêt une importance particulière en génie civil.

  On définit l'expert comme une personne disposant d'un savoir et d'un savoir-faire ; son raisonnement fait appel à ses connaissances théoriques (connaissances fines du système dont il est expert) et à la longue expérience dont il tire des précédents et son savoir-faire (Zwingelstein, 1995). Dans une approche d'analyse des risques basée sur l'expertise, l'expert adopte un raisonnement par analogie : il cherche à prévoir les évolutions futures de dégradations d'un ouvrage soumis à un mécanisme, en examinant le comportement d'ouvrages de même type déjà connus de lui.

## 2.3 *Les caractéristiques de la gestion patrimoniale*

Les parcs d'ouvrages de génie civil sont construits comme une réponse à un besoin économique et social (réseau de transports, d'assainissement, etc.). Ils constituent, pour la plupart, des patrimoines conséquents, de valeur technique et financière importante et dont l'utilité dépend de son état de performance et donc de la manière dont il est maintenu.

La gestion de patrimoine est généralement soumise à de fortes contraintes budgétaires, dans un contexte d'exploitation dynamique. Elle vise la maîtrise des coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance, et comprend deux aspects très liés : la gestion technique et la gestion financière (Lair, 2000).

La gestion technique concerne toutes les phases du cycle de vie de l'ouvrage, de la conception au démantèlement éventuel. Elle consiste à rechercher ou à maintenir un niveau de performance requis pendant une durée de vie donnée.

La gestion financière de l'ouvrage concerne tous les coûts engendrés au cours des phases du cycle de vie. Ces coûts sont liés à l'acquisition, à la construction, au fonctionnement, à la maintenance, à la réhabilitation, etc.

La gestion patrimoniale s'inscrit directement dans le cadre des principes du développement durable, avec pour notions principales :

- La transmission aux générations futures ;
- La rationalisation économique ;
- La prise en compte de l'environnement.

Dans les différents domaines du génie civil, cette notion est devenue essentielle et les différents parcs d'ouvrages font l'objet d'un dispositif de gestion patrimoniale adapté. L'activité scientifique et technique relative à la gestion patrimoniale est au cœur des préoccupations des différents gestionnaires et organismes de recherche (AUGC, 2003a, 2003b). Trois missions principales peuvent être considérées :

- Assurer la sécurité des parcs d'ouvrages : le dysfonctionnement des ouvrages et leur dégradation sont susceptibles de porter atteinte aux personnes et aux biens (riverains, utilisateurs et personnel d'exploitation). Face à une société devenue très sensible aux risques et à leur affichage, il est indispensable que les gestionnaires assurent une sécurité élevée pour leurs ouvrages ;
- Assurer que l'ouvrage remplisse ses fonctions requises : la dégradation des ouvrages peut entrainer des coûts indirects très élevés et difficiles à calculer. Par exemple, une étude réalisée par la Banque mondiale pour les pays en voie de développement (World Bank, 1988) estime que le mauvais état de leurs routes peut se traduire par une augmentation de 30% des coûts de transport (surconsommation de carburant, usure des véhicules, augmentation du temps de parcours, etc.) ;
- Garantir la pérennité des parcs d'ouvrages : la problématique actuelle de la gestion patrimoniale s'inscrit essentiellement dans la gestion de parcs anciens et vieillissants. Il s'agit donc de maintenir ou d'améliorer les patrimoines dans les meilleures conditions techniques et économiques, afin de « ne pas entraîner la gestion future vers une impasse, en laissant le soin à nos successeurs de réparer lourdement ou de remplacer ce que nous aurions dû traiter à temps, avec beaucoup moins de moyens » (Delfosse, 2001).

Les décisions à prendre, en termes d'opérations à réaliser, doivent considérer des échelles spatiotemporelles très diverses. Elles portent autant sur le long terme (prolongement de la durée de vie) que sur le court terme (traitement d'urgences) ; autant sur des composants individuels (comme la réparation d'un viaduc) que sur l'ensemble du parc (par exemple, la végétalisation des terre-pleins centraux sur une autoroute). Ces décisions font l'objet de programmes pluriannuels pour lesquels sont proposées une planification et une enveloppe budgétaire qui sont difficiles à argumenter et justifier. La complexité même de ce problème justifie le recours à de systèmes d'aide à la décision, s'appuyant eux-mêmes sur des modèles techniques et socio-économiques (Sanchez, 2007).

## 2.4 *Les enjeux de la gestion d'un patrimoine d'infrastructures de transport*

La gestion du patrimoine a besoin au préalable de la définition hiérarchisée des enjeux. Pour les infrastructures de transport l'enjeu est double : un enjeu de sécurité, d'abord, mais aussi un enjeu de disponibilité de service.

D'une façon générale, le développement des réseaux de transports se caractérise par une première phase, la construction, très rapide, où la notion d'entretien est souvent négligée. En effet, le prestige technique et politique est plus souvent associé à la capacité de construire des nouvelles infrastructures plutôt qu'à entretenir celles déjà existantes (Dupuy, 1986). Par contre, l'entretien n'attire l'attention que lorsque les désordres importants se manifestent.

Pour donner un exemple précis, on peut évoquer l'effondrement de la voûte du tunnel SNCF de Vierzy, en 1972, qui entraîna l'accident de deux trains. Le bilan humain de cette catastrophe fut très lourd : 108 morts et 111 blessés. C'est à partir de cet évènement qu'une nouvelle stratégie de surveillance et de maintenance préventive a été instaurée à la RATP.

Mais il faut aussi considérer les coûts sociaux induits par le mauvais état des infrastructures, moins visibles et difficiles à quantifier, mais qui, par contre, peuvent pénaliser l'économie du pays (Llanos, 1992). L'utilité produite par les infrastructures de transport ne dépend pas seulement de leur existence, ni même de leur capacité de service. Elle dépend également de leur état. Un mauvais fonctionnement des infrastructures de transport entraine une diminution de la productivité et de la compétitivité économique des pôles desservis (aéroports, centres touristiques, pôles d'emplois, entreprises, etc.) car le temps perdu n'est consacré ni aux loisirs ni à la production. Différentes études ont été réalisées pour quantifier ces coûts sociaux (Llanos, 1992), ainsi que pour évaluer les bénéfices apportés par une réduction des irrégularités de service (STIF, 2006).

En outre, les patrimoines d'infrastructures de transport présentent des ouvrages qui ne sont pas facilement remplaçables (ponts, tunnels, etc.) et dont l'obsolescence peut devenir un point critique vis-à-vis du fonctionnement global du réseau face aux évolutions des exigences de performance. Tel peut être le cas d'un changement d'un trafic ferroviaire standard à un trafic à grande vitesse ; les réglementations diffèrent (réglementation sismique, par exemple). Dans ce contexte, la gestion doit assurer que l'état de performance des ouvrages répond aussi à la nécessité de modernisation et de développement des réseaux de transports.

Nous voudrions aussi évoquer l'effet de la pression économique et du contexte politique, qui de plus en plus démontre qu'il est nécessaire de mettre en avant auprès des utilisateurs l'importance du rôle des gestionnaires. Un mauvais état des infrastructures peut induire une image de négligence et d'abandon des ouvrages que les utilisateurs interpréteraient comme un manque de sécurité. Par contre, une politique de transparence de la maintenance peut être une

opportunité de démontrer leur savoir-faire en termes de services, notamment en situation perturbée, et leur engagement pour limiter au maximum l'impact des actions de maintenance.

## 2.5 *Le problème technico-économique de la gestion des parcs d'ouvrages*

Les gestionnaires ne disposent généralement pas d'un budget suffisant pour réaliser l'ensemble des opérations de maintenance sur la totalité du parc d'ouvrages. Ils se posent donc une question majeure : par où commencer les actions de maintenance pour à la fois assurer le bon fonctionnement du patrimoine et optimiser les choix d'investissement ? (Serre, 2005).

En outre, les dégradations des infrastructures de génie civil sont de phénomènes cumulatifs. Pour cette raison, une intervention précoce peut freiner la dégradation des ouvrages et être une source d'économie dans le futur. Dans ce cas, de nouvelles questions se posent : quel est le moment optimal pour réaliser une action de réhabilitation ? Quel serait le surcoût produit par un report des interventions ? Serait-il judicieux de différer les dépenses jusqu'à ce que les fonctions des infrastructures ne soient plus assurées ? Et, selon l'optique du développement durable, quel serait le budget minimal pour assurer sur le long terme un niveau de sécurité optimal ?

***Pour donner réponse à ces questions et définir une stratégie de gestion performante, les aspects techniques et financiers doivent être considérés ensemble***. Dans cette perspective, des systèmes d'aide à la gestion ont été conçus à partir de cette interaction technico-économique (Lepert, 2006).

## 2.6 *Exemples de dispositifs de gestion patrimoniale*

Les stratégies de maintenance préventive reposent sur la prévision de l'évolution des ouvrages, en fonction de leur environnement et des sollicitations auxquelles ils seront soumis. Ces stratégies dépendent du type du parc d'ouvrages (Cremona, 2003). Un parc d'ouvrage est caractérisé notamment par le nombre d'ouvrages qui le composent (pour les parcs d'ouvrages ponctuels : ponts, barrages… ou pour les parcs d'ouvrages linéaires : réseaux enterrés, routes, digues, etc.) et par leur homogénéité ou leur hétérogénéité.

Dans le contexte d'un parc important d'ouvrages ponctuels homogènes ou d'ouvrages linéaires homogènes, où des données statistiques sont disponibles et où les mécanismes de dégradation sont bien maîtrisés, la maintenance basée sur la fiabilité est une méthode intéressante. Elle est fondée, entre autres, sur la connaissance des taux de fiabilité des éléments du système (Zwingelstein, 1996) :

- Identification des paramètres rentrant dans les conditions d'états-limites ;
- Caractérisation statistique de ces paramètres (lois et moments) ;
- Recherche des probabilités de non-respect des conditions d'état-limite.

Cette approche est couramment appliquée dans l'industrie offshore et le nucléaire, mais aussi aux réseaux de distribution. Nous renvoyons le lecteur intéressé vers (Zwingelstein, 1996).
La maintenance basée sur la fiabilité trouve ses limites dès lors que les données sont en quantités insuffisantes : mesures expérimentales difficiles, données statistiques peu nombreuses ou imprécises… Les calculs de probabilité deviennent alors rapidement complexes, voire impossibles et leur validité devient difficile à démontrer.

Dans le cadre d'un parc d'ouvrages ponctuels ou linéaires hétérogènes, dans des situations de structures mal connues, les données disponibles sont souvent de mauvaise qualité, ou en petite quantité, et rendent difficile la prévision de l'évolution des dégradations.

Dans ce contexte, la façon la plus simple d'évaluer les évolutions futures des dégradations est d'examiner les lois d'évolution d'ouvrages existants de conception similaire et ayant connu des mécanismes analogues en se basant sur le retour d'expérience (Cremona, 2003).

Quelques gestionnaires sont confrontés à la gestion préventive de parcs d'ouvrages à grand linéaire et hétérogènes. Afin de trouver des exemples applicables à notre méthodologie, nous avons réalisé une recherche bibliographique basée sur les différents domaines :

- Méthodes d'optimisation de la maintenance dans le domaine industriel ;
- Méthodes de gestion de patrimoines appliquées dans le génie civil : ouvrages enterrés d'assainissement, parc d'ouvrages portuaires ;
- Méthodes de gestion de patrimoine dans le secteur des transports : parc d'ouvrages départementales et patrimoine d'autoroutes.

Même si ces ouvrages sont de nature très différente de celle des infrastructures qui composent le patrimoine de la RATP, la gestion de ces patrimoines ont les similitudes suivantes avec la problématique de notre étude :

- Surveillance visuelle de l'état des ouvrages : variabilité des résultats et difficultés (voire impossibilités) à obtenir des données concernant l'environnement des ouvrages sans appliquer des méthodes destructives ;
- Politiques de maintenance préventive pour des ouvrages en service à forts enjeux de sécurité et économiques ;
- Ressources disponibles pour la maintenance, par nature, limitées.

### *2.6.1 Méthodes d'optimisation de la maintenance dans le domaine industriel*

Dans le domaine du génie industriel, les défaillances des systèmes présentent des risques vis-à-vis des personnes, de l'environnement (nucléaire et aéronautique par exemple), et de la productivité. Il y a donc un vrai intérêt à appréhender les limites des domaines d'utilisations à risques pour, d'une part, limiter au maximum les dangers et, d'autre part, diminuer les interventions inutiles qui consomment des ressources économiques et interrompent la productivité industrielle. C'est dans ce contexte que la maintenance s'est dotée de méthodes qui considèrent la ***technique*** et l'***organisation***.

Certaines de ces méthodes ont été initialement développées dans les domaines de l'aéronautique et de la production de l'électricité (en particulier pour les centrales nucléaires). Nous présentons ici les méthodes de maintenance basée sur la fiabilité (MBF) et la méthode RCM (Reliabilty Centered Maintenance). Pour plus de renseignements sur les différentes méthodes d'optimisation de la maintenance dans le domaine industriel, nous dirigeons le lecteur intéressé vers (Zwingelstein, 1996).

***Méthodes de maintenance basée sur la fiabilité (MBF)***

Ces méthodes ont leur origine au milieu des années 1960. Le groupe *Maintenance Steering Group* (MSG) a élaboré un premier document, le MSG-1, pour déterminer la maintenance préventive dans l'industrie aéronautique. Cette première version a été affinée au fil des années pour aboutir au document actuel, le (MSG-3, 1993).

La MBF correspond à une politique de maintenance qui identifie d'abord les matériels critiques dont les conséquences des défaillances fonctionnelles sont importantes face aux enjeux de sécurité, disponibilité, coûts, etc. L'intérêt de la MBF est de donner un cadre précis et des règles

pour établir un programme de maintenance à l'aide d'une méthode d'analyse structurée et rationnelle qui complète l'action des experts des matériels. La définition d'un programme MBF se résume en deux étapes principales : l'identification des matériels critiques et la sélection des tâches de maintenance.

La recherche des matériels critiques d'un système repose sur la détermination du cheminement et des conséquences de leurs modes de défaillance fonctionnelle sur les fonctions principales assurées par le système (fig. 2-4) :

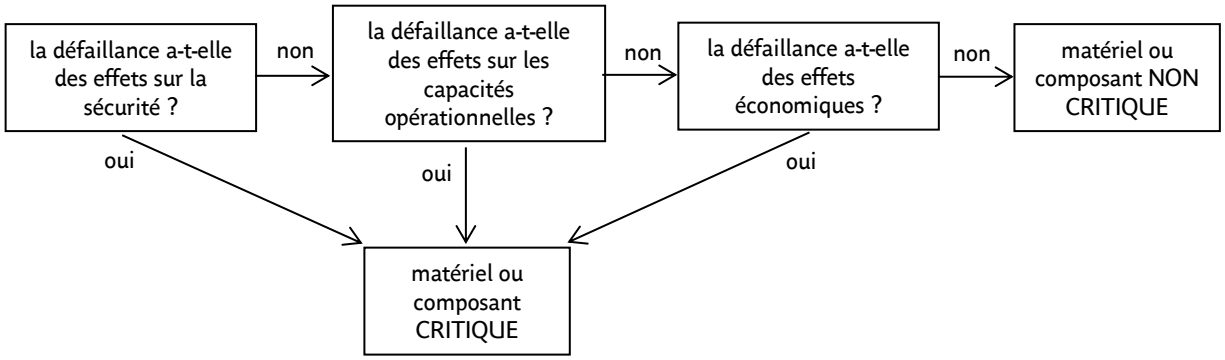



*Figure 2-4: Exemple de critères de sélection des composants critiques (Zwingelstein, 1996)*

Les outils les plus utilisés dans cette phase sont l'Analyse Fonctionnelle (AF), l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) et l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC). L'utilisation des données de fiabilité permet de déterminer de façon qualitative ou quantitative la criticité et la gravité des modes de défaillance. Dans les cas où les données de fiabilité sont insuffisantes ou de mauvaise qualité, ces déterminations sont assurées par jugement collectif d'experts.

La sélection des tâches de maintenance est réalisée en fonction de la criticité des composants. Pour les composants critiques, la maintenance est préventive et exécutée à intervalles spécifiés. Ce type de maintenance est pourtant programmable. Par contre, pour les composants non critiques, la maintenance corrective est la seule alternative proposée par la méthode MBF. L'objectif est simplement de remettre en état le composant une fois que la défaillance est survenue. Dans ce cas, les actions correctives ne sont donc programmables.

***Méthode RCM (Reliability Centered Maintenance)***

Cette méthode a été développée dans le domaine de l'aéronautique et publiée pour la première fois en 1978. La RCM ne retient que les tâches de maintenance qui sont relatives au maintien du niveau de fiabilité intrinsèque défini à la conception et comporte plusieurs caractéristiques :

- La logique de sélection des tâches commence par une évaluation des conséquences des défaillances ;
- Les modes de défaillance d'un élément qui entraînent une défaillance fonctionnelle sont analysés seulement après avoir analysé leurs conséquences ou effets ;
- Les tâches de maintenance sont ensuite sélectionnées en fonction des conséquences des défaillances et sont directement liées à leurs causes spécifiques.

La méthode RCM utilise quatre tâches de maintenance :

- Les inspections programmées à intervalles réguliers pour découvrir les défaillances potentielles ;
- Les travaux programmés de remise en état à, ou avant, la durée de vie spécifiée ;
- La mise au rebut à, ou avant, la durée de vie spécifiée ;
- Les inspections programmées pour découvrir toutes les défaillances qui ont déjà été rencontrées mais qui ne sont pas considérées comme évidentes.

La logique de sélection des tâches programmées de maintenance de la RCM repose sur des critères d'applicabilité, qui dépendent du mode de défaillance objet de la tâche, et d'efficacité, qui dépend des conséquences de la défaillance.

***Synthèse***

Ces méthodes déterminent les actions de maintenance préventive à réaliser en fonction des conséquences qui peuvent avoir lieu en cas de défaillance du système. Dans ce cas, les outils de la Sûreté de Fonctionnement, tels que l'AF, l'AMDE, l'AMDEC, etc., s'avèrent utiles pour analyser les modes de défaillance des systèmes et leurs effets.

Ces méthodes, développées dans le domaine industriel, peuvent également s'appliquer à d'autres domaines où l'importance des enjeux fait privilégier les actions de maintenance préventive. Tel est le cas du génie civil, où les conséquences des défaillances du système peuvent provoquer des impacts très sévères en termes économiques et, dans certains cas, en vies humaines. Dans le contexte du génie civil, nous trouvons différentes applications des outils de la Sûreté de Fonctionnement pour optimiser la maintenance. Par exemple, dans le domaine des routes (Valadas, 2003), des digues (Serre, 2005), du transport guidé (Gonzva et *al.*, 2014), etc.

Ces outils semblent adaptés pour traiter l'aspect technique de la gestion du patrimoine. Notamment pour évaluer l'état structurel des ouvrages et analyser les risques auxquels ils sont exposés. Néanmoins, ces méthodes ne permettent pas d'aborder les aspects socio-économiques concernant le fonctionnement d'un réseau de transports en milieu urbain, ni les différentes contraintes de natures autres que techniques qui affectent la gestion du patrimoine. Dans ce cas, nous devons élargir notre recherche bibliographique afin de trouver d'autres méthodes qui nous permettent de couvrir l'ensemble du problème de la gestion patrimoniale. Pour ce faire, nous présentons différents exemples dans le domaine du génie civil.

### *2.6.2 Méthodes de gestion patrimoniale dans le génie civil*

***Les ouvrages enterrés d'assainissement***

Le parc des réseaux d'assainissement en France (assainissement eaux usées et pluviales) présente un linéaire compris entre 160 000 km (Diab, 2002) et 250 000 km (Vasconcelos et *al.*, 2004) dont la moitié a plus de 50 ans. La grande amplitude de cet écart démontre la méconnaissance du réseau et la difficulté de l'estimer. Ce parc se divise en deux catégories : les ouvrages visitables et les ouvrages non visitables (diamètre inférieur à 800 mm). Ces ouvrages ont pour fonction de collecter et de transporter les eaux usées et les eaux pluviales.

Les informations relatives à l'état des ouvrages sont obtenues soit visuellement, soit à l'aide d'inspections télévisées pour les plus petites sections. D'autres données, relatives à leur environnement, sont également déterminantes pour évaluer la performance du réseau. Ces données portent sur la nature du sol entourant le tuyau, l'occupation du sol au-dessus du tuyau (route, bâtiment…), la présence de racines près du tuyau, etc. (Laffréchine, 1999). La collecte de certaines de ces données est très difficile, voire impossible sans appliquer de méthodes destructives.

La gestion traditionnelle se basait essentiellement sur la gestion des urgences : le gestionnaire n'intervient que lorsque la défaillance a eu lieu et lorsque les effets se font sentir sur l'environnement (Abraham et *al*., 1998). Mais des méthodes et des outils ont été développés pour améliorer la gestion de ce type de patrimoine dans le cadre de politiques de maintenance préventive.

Ce changement de stratégie a exigé l'amélioration de l'évaluation structurelle des ouvrages et le développement de méthodologies pour définir les programmations de travaux de maintenance. Dans ce contexte, afin d'améliorer l'aspect technique de la gestion, des méthodes pour construire des indicateurs de performance ont été développées (Diab, 2002 ; Le Gauffre et *al.,* 2004a). Ces indicateurs permettent une évaluation de l'état structurel des ouvrages plus précise à partir de l'information issue des actions de surveillance. D'autres méthodes ont été développées dans le but de définir des stratégies de maintenance optimisées. Nous présentons les exemples CARE-W (Le Gauffre et *al*., 2002) et RERAU (Le Gauffre et *al*., 2004b).

***CARE-W (Le Gauffre et al., 2002)***
Cette méthode propose l'élaboration d'une stratégie à long terme de la planification et des investissements nécessaires pour assurer la gestion des réseaux d'assainissement. Pour ce faire, le point de départ est représenté par la question « quel ouvrage réhabiliter et quelle est l'action à appliquer ? ». Pour donner une réponse, cette méthode définit un système d'aide à la décision basé sur différents critères de priorisation. Ces critères sont classés dans deux catégories : les *critères internes* et les *critères externes*.

Les *critères internes* représentent le point de vue du gestionnaire et concernent les aspects techniques et économiques :

- Coût de la réhabilitation ;
- Coût de la réparation ;
- Coûts d'interruption du service ;
- Coûts énergétiques.

Les *critères externes* représentent les aspects qui concernent les éléments externes au système d'assainissement, comme par exemple, les clients, l'environnement, etc. :

- Perturbations associés à une méthode de réhabilitation en particulier ;
- Impacts de l'interruption de l'approvisionnement en eau ;
- Nuisances et perturbations causées par les actions de réhabilitation ;
- Déficience de la qualité de l'eau ;
- Déficiences hydrauliques.

Finalement, afin de définir les programmes de réhabilitation, chaque action est évaluée à partir de ces critères et la priorisation est réalisée à partir d'outils multicritère d'aide à la décision (Roy et Bouyssou, 1993 ; Rogers et *al*., 2000).

***RERAU (Réhabilitation des Réseaux d'Assainissement Urbains) (Le Gauffre et al., 2004b)***
Cette guide propose des éléments méthodologiques pour aborder le problème de la gestion patrimoniale dans son ensemble. Elle vise à constituer une aide à l'organisation des actions d'observation, d'évaluation et de réhabilitation nécessaires au maintien ou au rétablissement d'un niveau de service satisfaisant. Pour ce faire, elle considère les aspects structurels, fonctionnels et environnementaux d'un réseau d'assainissement dans une perspective multi échelle : un tronçon de réseau, un secteur du réseau (plusieurs tronçons ou bassin versant), ou le réseau dans sa globalité. Les éléments méthodologiques de ce guide sont basés sur des indicateurs de performance et critères de décision pour la programmation d'actions.

Les indicateurs de performance sont établis à partir de l'état physique des ouvrages et les conséquences ultimes des défauts, en passant par leurs conséquences fonctionnelles. Ces indicateurs sont définis à trois niveaux :

- Les *défauts*, caractérisant l'état physique des ouvrages ;
- Les *dysfonctionnements*, ou les conséquences de défauts sur le fonctionnement des ouvrages ;
- Les *impacts*, traduisant le caractère plus ou moins nocif des dysfonctionnements en fonction du contexte de l'ouvrage.

Les critères de décision sont définis en associant aux impacts des défauts observés au estimés susceptibles d'en être l'origine. Par exemple, pour un défaut d'étanchéité, un critère sera défini par le couple [infiltration – pollution des eaux de surface].

Chaque ouvrage est évalué selon chaque critère, donnant lieu à une évaluation de synthèse obtenue par moyenne pondérée. Le poids de chaque critère est fixé par le gestionnaire pour représenter l'importance relative de chaque critère dans la décision finale (fig. 2-5).

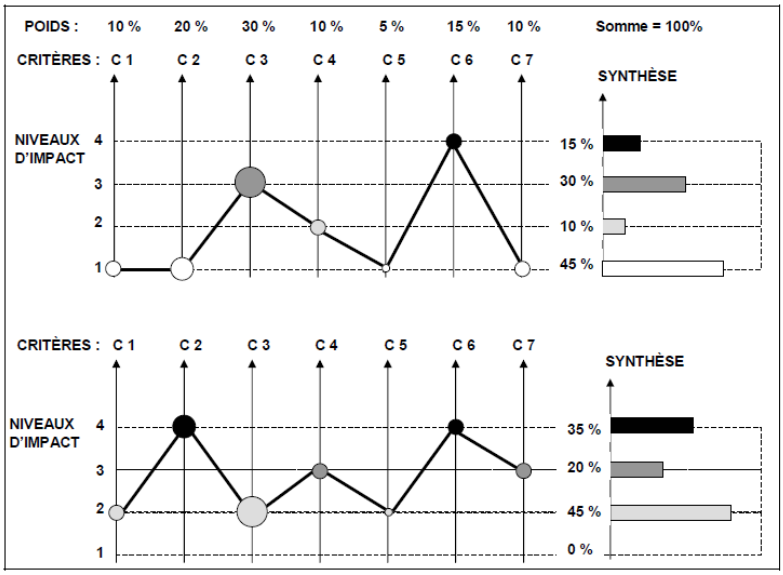



*Figure 2-5: Profils multicritère de deux tronçons, en considérant 7 critères de décision (Le Gauffre et al., 2004b)*

En comparant les synthèses des deux profils multicritère obtenus par une moyenne pondérée, on met facilement en évidence la priorité d'intervention sur le cas inférieur de la figure 2-5.

Des méthodes d'analyse multicritère, par exemple les méthodes ELECTRE (Maystre et *al.*, 1994), peuvent également être envisagées pour classer les ouvrages par niveaux de priorité. Ces méthodes ont été appliques pour hiérarchiser les besoins en réhabilitation au sein d'une population de conduites d'eau potable (Le Gauffre et *al.*, 2004c).

***Parc d'ouvrages portuaires***

Le patrimoine des ouvrages portuaires se caractérise par son hétérogénéité dérivée de la variété des typologies d'ouvrages, la plus ou moins grande complexité de leurs structures et la multiplicité de leurs utilisations.

Pour améliorer la gestion de ce patrimoine, la méthode VSC (Visite Simplifiée Comparée) (Fauchoux et *al*., 2006) a été appliquée à ce type d'infrastructures (Fauchoux et *al*., 2011). Cette méthode propose une définition des priorités d'intervention en fonction de deux indices :

- L'indice d'état de l'ouvrage (IE) qui permet d'évaluer l'état technique de l'ouvrage;
- L'indice stratégique (IS) qui représente l'importance stratégique de chaque ouvrage au sein du patrimoine.

L'indice d'état (IE) est déterminé en fonction des résultats des inspections visuelles périodiques. Par contre, la définition de l'indice stratégique (IS) présente une vision multicritère. Afin de classer objectivement tous les ouvrages du patrimoine, compte tenu de leur diversité, l'importance stratégique des ouvrages est établie au regard des critères décisionnels suivants :

- Type de trafic ;
- Valeur économique ;
- Valeur ajoutée de la marchandise débarquée ;
- Trafic de passagers sur l'ouvrage ;
- Caractère substituable du trafic (y a-t-il la possibilité de reporter tout ou partie du trafic sur les autres ouvrages du port ?) ;
- Valeur ajoutée perdue.

Ensuite, cette démarche propose un croisement des deux indices permettant de considérer le risque d'avoir une défaillance (indice d'état IE) et les conséquences de cet aléa (indice stratégique IS). Les modalités de ce croisement ne sont pas fixées, mais laissées au choix du gestionnaire. De cette façon, il peut, par exemple, selon sa politique de gestion, privilégier l'aspect technique par rapport à l'aspect stratégique ou inversement. La seule règle imposée consiste à considérer comme prioritaires les ouvrages dont l'indice d'état (IE) présente la valeur la plus défavorable, quel que soit l'indice stratégique (IS) de l'ouvrage. De cette façon, cette méthode permet d'intégrer la notion de « véto » en considérant la sécurité comme l'enjeu le plus important.

***Synthèse***

Dans les différentes méthodes de gestion patrimoniale dans le domaine du génie civil, nous avons constaté qu'elle est basée, dans un premier temps, sur une évaluation de l'état structurel des ouvrages. Dans un second temps, les méthodologies analysées proposent l'utilisation de critères de décision. Ces critères permettent de prendre en compte d'autres aspects qui ne sont pas traités dans l'évaluation technique, mais qui, cependant, sont considérés par les gestionnaires pour configurer les programmes de maintenance. Les critères de décision représentent le coût économique, la qualité de service, les impacts sur l'environnement, etc. Nous avons identifié également différentes méthodes multicritère qui ont été déjà appliquées dans ces exemples tels que la moyenne pondérée (Le Gauffre et *al*., 2004b), ou les méthodes ELECTRE (Maystre et *al.*, 1994), (Le Gauffre et *al.*, 2004c).

La définition de critères se réalise en fonction des caractéristiques du patrimoine à gérer et des préférences des gestionnaires. Dans l'étape suivante, nous focalisons notre recherche bibliographique dans le domaine des transports. Notre objectif est d'identifier, dans un contexte plus proche de notre problématique, les critères et méthodologies qui peuvent être appliquées dans notre recherche.

### 2.6.3 Modes de gestion développées dans le domaine des transports

La préoccupation des gestionnaires des patrimoines d'infrastructures de transport est d'assurer la sécurité et la pérennité des ouvrages, tout en préservant le niveau de qualité du service. En dehors des exigences de l'exploitation, les gestionnaires sont confrontés aux contraintes imposées par l'environnement dans lequel s'intègre le patrimoine.

Une étude de Benchmark réalisée par la RATP (Suciu et *al*., 2013) nous a permis d'identifier les différents modes de gestion dans le domaine des infrastructures de transport. L'ensemble de participants est composé par 20 gestionnaires de différents pays d'Europe, Amérique et Asie, afin d'obtenir une vision globale des méthodes de gestion dans le monde. Les gestionnaires consultés font partie du domaine ferroviaire (métro et grandes lignes nationales et internationales) et d'autres infrastructures de transport : aéroports, routes et ouvrages d'art, etc.

Presque la totalité des gestionnaires réalise une gestion interne à partir des surveillances périodiques établies par une réglementation. Ces actions sont principalement visuelles et permettent de détecter les désordres pouvant affecter la résistance structurelle des ouvrages. Les résultats de ces actions sont représentés par un système de notation qui peut être propre à chaque gestionnaire (échelle de 1 à 7 pour le cas de la RATP) ou par adaptation à d'autres déjà existants, comme c'est le cas de la méthodologie IQOA (SETRA, 1996) pour les routes. Ces systèmes de notation sont utilisés pour suivre l'état global du patrimoine, avant d'être un outil de décision.

A partir de là, les gestionnaires visent à appliquer une gestion préventive et définir la programmation des travaux à partir des bilans de santé issus des actions de surveillance. Ils doivent donc évaluer l'urgence des travaux à réaliser et établir une hiérarchisation. Dans cette prise de décisions, il y a une forte implication du jugement de l'expert qui repose sur un savoir-faire technique accumulé au fil du temps. Les critères principalement considérés sont de caractères techniques, mais aussi relatifs aux caractéristiques de l'environnement, à l'impact sur l'exploitation et économiques.

La gestion de patrimoine est donc un problème complexe qui induit de nombreuses décisions dans un contexte multicritère et multi acteurs. Même si, en dernier ressort, la décision finale incombe à une entité clairement identifiée, celle-ci est affectée par l'interaction entre tous les acteurs du processus décisionnel : du processus d'évaluation du bilan de santé, à la programmation de travaux. Les intervenants dans la gestion du patrimoine conditionnent directement la décision en fonction des informations dont ils disposent et chacun, selon sa fonction, ses responsabilités, son expérience, et son savoir-faire, peut les interpréter différemment.

Il y a donc un réel intérêt à formaliser ce processus décisionnel et à développer des outils d'aide à la décision pour définir des stratégies de maintenance optimisées. Notre recherche bibliographique nous a permis d'identifier différentes solutions d'optimisation de la gestion du patrimoine, qui s'appuie sur des modèles techniques et économiques.

Les modèles techniques se basant sur le développement de lois de dégradation et d'effet des travaux permettraient d'estimer la durée de vie et la durée de vie résiduelle des ouvrages à un instant donné (fig. 2-6).

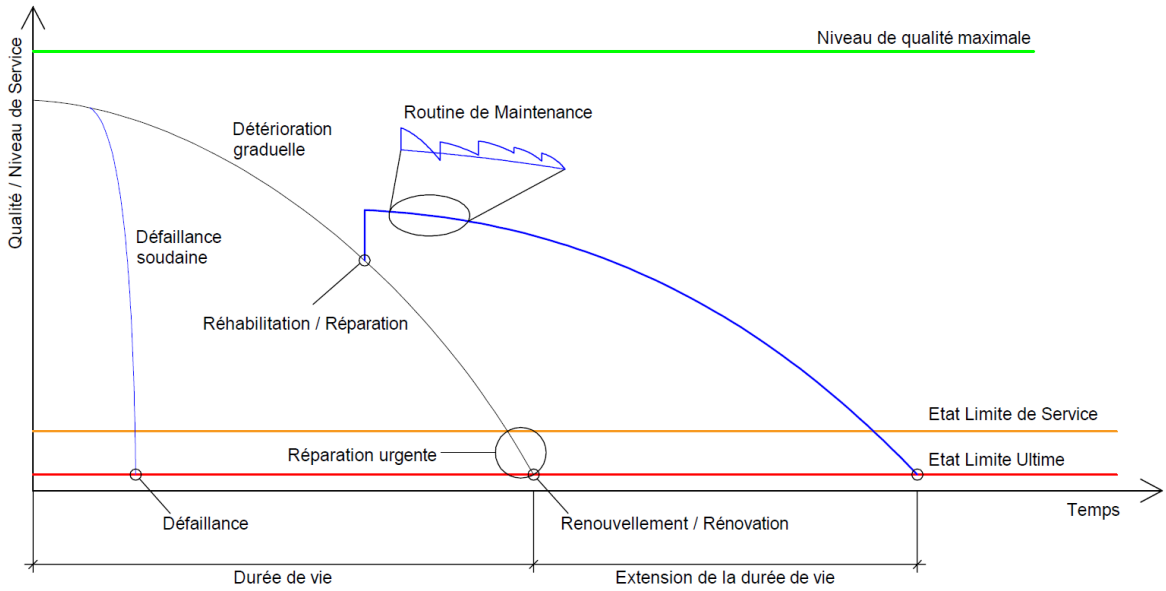



*Figure 2-6: Evolution de l'état de service d'un tunnel et influence de la maintenance (Llanca, 2014).*

En fonction de ces résultats, il serait possible d'orienter la stratégie de gestion et déterminer si plusieurs interventions précoces sont plus efficaces qu'une intervention tardive (voire de remplacement), ainsi que le moment optimal pour les réaliser.

Il est important de noter que la fiabilité d'une indication de l'évolution d'un ouvrage dépend fortement de la robustesse des modèles de dégradation. Les incertitudes sur la robustesse augmentent en fonction du temps et donc, les indications de l'état structurel de l'ouvrage et des prévisions de travaux ne seraient précises qu'à court terme. Le développement de lois de dégradation semblerait une méthode adaptée à l'échelle individuelle et pour des ouvrages composés par éléments dont la durée de vie est bien connue. Mais ce n'est pas le cas, malheureusement, pour la plupart des ouvrages de génie civil. En outre, dans un contexte de patrimoine hétérogène, où chaque ouvrage est différent et est soumis à l'agressivité d'un environnement particulier, l'obtention de modèles de dégradation valables pour la globalité du parc d'ouvrages se présente comme une tâche trop complexe et peu robuste.

Néanmoins, la notion de l'évolution de l'état structurel des ouvrages doit être prise en compte pour définir une gestion efficace à moyen et long terme, mais, pour la gestion d'un parc d'ouvrages, les simplifications s'avèrent nécessaires. Dans ce cas, différentes approches sont possibles, comme par exemple, les approches statistiques ou l'extrapolation de courbes d'évolution des ouvrages existants de même conception et ayant connu des mécanismes de dégradation analogues (Cremona, 2003).

Par rapport à l'aspect financier de la gestion, les recherches se focalisent sur l'optimisation des ressources disponibles et la définition de stratégies de maintenance capables d'assurer le meilleur état de performance de façon durable et à moindre coût. Mais les coûts de maintenance sont difficiles à prévoir et les gestionnaires ont besoin de développer des modèles d'analyse économique. Ces modèles sont utilisés pour comparer diverses politiques d'entretien en fonction du rapport coût-bénéfice. Ils sont ramenés à la proposition suivante (fig. 2-4) : on fait l'hypothèse qu'il existe, à un niveau de service maintenu donné, un coût minimal d'exploitation qui est la somme d'un coût des travaux d'entretien, et d'un coût d'usage.

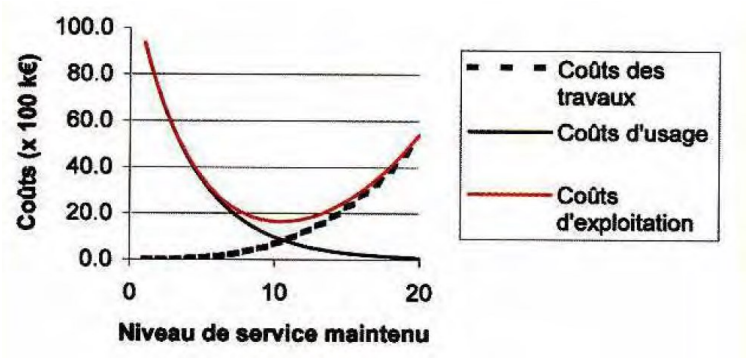



*Figure 2-7: Principe de l'analyse technico-économique de l'entretien du réseau routier (Lepert, 06).*

Dans ces conditions, il serait possible de comparer diverses politiques d'entretien en actualisant chaque année les rapports coûts-bénéfices qu'elles génèrent, et d'étudier leurs conséquences techniques et financières afin de retenir la plus adaptée (Lepert, 2006).

Mais il faut considérer aussi les coûts indirects ou sociaux associés à la gestion du patrimoine, qu'il est difficile de quantifier car ils sont très épars (Boiteux et *al.*, 2001). Les ralentissements, les interruptions d'exploitation ou les déviations d'itinéraires provoqués par un mauvais état des infrastructures de transport entraînent des pertes de temps et donc, des coûts à l'usager (Orcesi, 2008). Ce temps perdu n'est plus consacré aux loisirs, ni à la production, et il est générateur d'une perte pour l'ensemble de la collectivité. Par exemple, les entreprises pour lesquelles le temps de transport est un facteur à part entière de son coût de production, la fiabilité des itinéraires, les charges admissibles, les vitesses maximales autorisées, etc. peuvent augmenter ou diminuer les coûts de production des entreprises. Tous ces facteurs dépendent de l'état de performance des infrastructures et, même si les coûts sociaux ne sont pas ressentis directement par le gestionnaire, ils sont à prendre en compte lors de la définition des politiques de maintenance.

Nous présentons ensuite deux exemples de gestion patrimoniale : les ouvrages d'art départementaux (SETRA, 2006), et la société d'autoroutes ESCOTA (Sanchez, 2007).

***Gestion des ouvrages d'art. A l'usage des départements et autres collectivités locales (SETRA, 2006)***

Cette méthode concerne les ouvrages d'art qui font partie des patrimoines départementaux (ponts, viaducs, murs de soutènement, tunnels, buses, etc.) et qui sont d'une importance capitale pour les réseaux d'infrastructures (routes, voies ferrées, etc.). Les départements et les services techniques chargés de leur suivi et de leur entretien doivent mettre en place une politique de gestion globale et décider des actions nécessaires à la maintenance d'un parc départemental d'ouvrages d'art, en accord avec les politiques budgétaires. A cette diversité de structures, qui complexifie leur gestion à l'échelle d'un département, s'ajoute celle de l'organisation des collectivités territoriales qui mettent en œuvre les programmes de maintenance, ainsi que celle de leurs politiques budgétaires.

Cette méthode doit satisfaire à des exigences fondamentales :

- Obtenir une image fiable de l'état du patrimoine ;
- Identifier les risques éventuels encourus par les usagers ;
- Faciliter la mise en œuvre d'une politique d'entretien et de préservation du patrimoine ;
- Optimiser les actions de gestion, afin de parvenir à l'adéquation des moyens et des résultats.

Elle doit également prendre en compte les spécificités des départements :

- Les parcs départementaux d'ouvrages d'art sont, dans la plupart des cas, importants, mais très variables : si chaque département possède en moyenne 900 ponts, les effectifs départementaux vont d'un minimum de 150 à un maximum de 2 600 ;
- L'organisation des services gestionnaires diffère selon les départements : la répartition des tâches doit s'adapter aux moyens disponibles ;
- Les enjeux socio-économiques varient selon les départements : chaque maître d'ouvrage doit être à même de pouvoir les définir.

Cette méthode, initialement établie pour les ponts, vise à définir une hiérarchie des travaux de maintenance en fonction de l'intérêt socio-économique des ouvrages et du niveau de service souhaité. Elle permet notamment (fig. 2-8):

- De donner une évaluation de l'état des ouvrages d'art;
- D'établir des critères socio-économiques en fonction de la politique décidée par le maître d'ouvrage ;
- De proposer une pré-programmation des actions de maintenance;
- De fournir des données macro-économiques sur le coût de la maintenance.

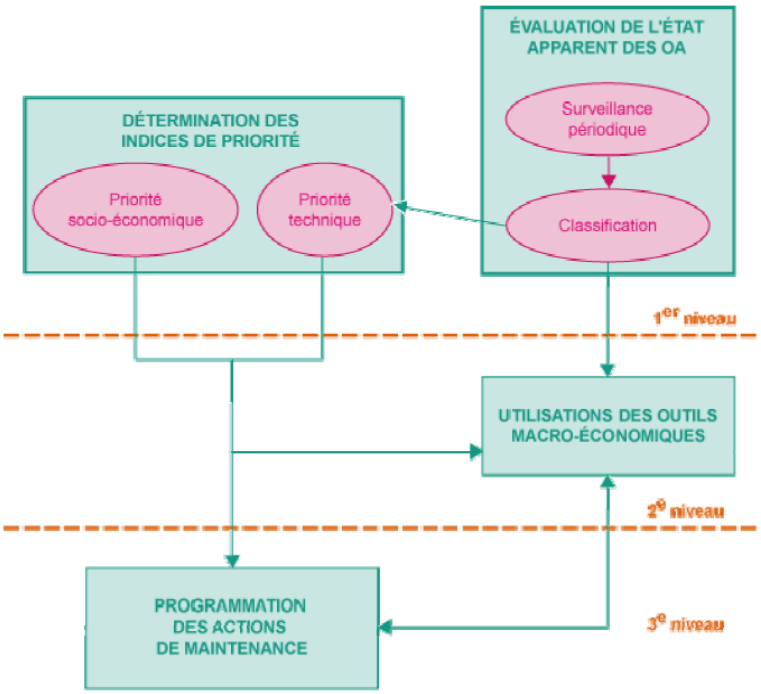



*Figure 2-8: Articulation des outils de la Méthode départementale (SETRA, 2006).*

L'*évaluation de l'état* est basée sur la surveillance périodique. La classification des ouvrages s'opère en fonction de leur état apparent, déterminé à partir des désordres constatés lors des opérations de surveillance.

Dans une deuxième étape, l'objectif est de déterminer l'ordre de priorité de réparation des ouvrages selon des critères techniques et des critères socio-économiques. Les *indices de priorité technique (IT)* permettent de définir dans quel ordre il serait souhaitable d'engager des réparations sur les ouvrages concernés, sans prendre en considération leur importance socio-économique. Ils sont déterminés en fonction de :

- L'évolution potentielle de l'état de l'ouvrage (désordres stabilisé ou évolutifs) ;
- L'évolution potentielle du coût de la réparation, dans l'hypothèse où celle-ci est différée ;
- L'environnement de l'ouvrage et son évolution probable ;
- L'évolution des charges sur l'ouvrage ;
- La nature de l'ouvrage et son niveau de fragilité.

Les *indices de priorité socio-économiques (ISE)* sont conçus pour refléter le niveau d'intérêt que présentent les ouvrages d'un point de vue stratégique, politique, économique, social, culturel, etc., afin d'en tenir compte dans la politique de maintenance. Le processus d'attribution se décompose en deux étapes :

- Définition des règles de détermination des IES par le maître d'ouvrage ;
- Mise en œuvre de ces règles par le gestionnaire dans le but d'attribuer un indice ISE à chaque ouvrage.

La programmation des actions de maintenance est réalisée à partir de la combinaison des indices techniques et socio-économiques. En outre, elle tient compte des moyens humains et financiers dont le gestionnaire dispose.

Dans une dernière étape, ce guide propose l'élaboration d'un recueil d'informations sur les coûts de maintenance permettant de représenter graphiquement les coûts à court et moyen terme, mais également mesurer a posteriori l'efficacité de sa politique de maintenance. Il apparaît nécessaire que les gestionnaires disposent d'estimations macro-économiques adaptables aux besoins budgétaires à moyen et long terme. Toutefois, le nombre de variables indépendantes susceptibles d'intervenir dans l'évolution d'un ouvrage d'art semble trop important pour que l'on puisse escompter, à brève échéance, bâtir des modèles numériques fiables de vieillissement et de maintenance. Malgré cette carence, la guide propose de déterminer un coût moyen des actions périodiques de maintenance à partir des scénarios d'intervention connus par les gestionnaires. De cette façon, les gestionnaires auront à leur disposition des outils donnant a posteriori une vision synthétique du coût des activités de maintenance et des indications complémentaires sur l'évolution des besoins financiers.

***Gestion des autoroutes par la société ESCOTA (Sanchez, 2007)***

La société d'autoroutes ESCOTA est le gestionnaire de 460 km de chaussées autoroutières. Ce patrimoine est composé de 818 ouvrages d'art, 40 tunnels, 871 bâtiments et plus de 1900 ha d'espaces verts. Comme tout gestionnaire de patrimoine, elle doit garantir la sécurité des usagers et le bon fonctionnement de leur réseau dans le temps. Cette mission se situe dans un contexte multi acteurs : différents intervenants dans la chaîne de traitement de l'information ; et multicritère : aspects techniques, de réglementation en vigueur, le coût des opérations, etc., le tout dans un contexte sociétal évolutif (fig. 2-9).


*Figure 2-9: Processus décisionnel concernant la gestion du patrimoine chez la société ESCOTA (Sanchez, 2007)*

La thèse doctorale réalisée par (Sanchez, 2007) propose une optimisation de la gestion patrimoniale, portant une attention toute particulière à l'aspect multicritère de l'évaluation de l'état du patrimoine, de l'urgence et de la priorité des opérations afférentes. Cette optimisation résulte du couplage entre un système d'information et un outil d'aide à la décision basé sur une évaluation multicritère hiérarchique.

Les critères utilisés sont:

- Etat de santé ;
- Critères métiers ;
- Caractéristiques propres à l'ouvrage
- Localisation
- Caractéristiques liées à l'environnement

Ces critères sont définis par les gestionnaires et agrégés dans un seul score global, obtenu grâce à une moyenne pondérée selon la méthode MACBETH (Clivillé, 04). La valeur relative de chaque critère est déterminée selon l'avis des experts.

***Synthèse***

Les gestionnaires des patrimoines d'infrastructures de transports visent à appliquer des politiques de gestion préventives, afin d'assurer la sécurité et la capacité de service des ouvrages. Les patrimoines à gérer se caractérisent par la variabilité des types d'ouvrages et, dans la plupart des cas, par la pluralité d'acteurs qui peuvent intervenir dans le processus décisionnel.

Les programmations des travaux sont établies à partir des bilans de santé issus des actions de surveillance, tenant compte uniquement des critères techniques. Dans un second temps, les gestionnaires évaluent le degré d'urgence des travaux à réaliser et établissent une hiérarchisation en fonction d'autres critères de nature socio-économique. Dans cette phase du processus décisionnel, il y a une forte implication du jugement de l'expert qui repose sur un savoir-faire accumulé au fil du temps.

Les critères techniques tiennent compte principalement de l'état structurel des ouvrages, mais aussi des caractéristiques de l'environnement et de l'impact sur l'exploitation.

Les critères socio-économiques concernent d'autres aspects tels que le coût des actions de maintenance et leur évolution probable, et une évaluation des ouvrages en fonction de leur intérêt dès un point de vue stratégique, politique, culturel, etc. En outre, ils tiennent compte des moyens humains et financiers dont le gestionnaire dispose.

La construction de ces critères est réalisée à partir de l'expertise des gestionnaires et doit être cohérente avec l'analyse multicritère qu'ils supportent. Dans ce contexte, les échelles numériques discrètes s'avèrent utiles pour les gestionnaires qui sont habitués à manipuler communément des étiquettes numériques (Sanchez, 2007). Tel est le cas de la RATP, où l'évaluation de l'état structurel est réalisée sur une échelle numérique de 1 à 7.

Le compromis entre les critères techniques et les critères socio-économiques est déterminé soit à partir de l'avis des gestionnaires (SETRA, 2006), soit par des méthodes multicritère simples comme la moyenne pondérée (Sanchez, 2007).

## 2.7 *Synthèse*

Les patrimoines d'infrastructures de transport sont construits comme une réponse à un besoin économique et social. Ils constituent, pour la plupart, des patrimoines conséquents, de valeur technique et financière important et dont l'utilité dépend de leur état de performance et donc de la manière dont ils sont entretenus. Les conséquences d'une défaillance éventuelle pourraient entraîner des forts impacts économiques et même des pertes de vies humaines. Dans ce contexte, la gestion patrimoniale est soumise à des enjeux très sévères qui mènent les gestionnaires à appliquer des politiques de maintenance préventives.

***La gestion patrimoniale est généralement soumise à de fortes contraintes budgétaires et de qualité de services. Dans ce contexte, afin de pouvoir appliquer des stratégies optimisées de maintenance préventive, la capacité des gestionnaires à évaluer l'état structurel du patrimoine devient essentielle.*** La recherche bibliographique réalisée sur les méthodes de maintenance dans le domaine industriel nous a permis d'identifier les outils de la Sûreté de Fonctionnement pour traiter l'aspect technique de la gestion des infrastructures de transport. En effet, elles permettent de modéliser le fonctionnement des systèmes complexes, comme c'est le cas des ouvrages de génie civil, et d'identifier les modes de défaillance des ouvrages, ainsi que leurs causes et leurs effets (Villemeur, 1988). En outre, les résultats obtenus grâce aux outils de la Sûreté de Fonctionnement constituent la base pour la construction d'indicateurs de performance à partir des données issues des inspections visuelles (Serre, 2005).

***Les indicateurs de performance constituent un outil bien adapté pour établir une première priorisation des ouvrages à traiter. Mais ils ne nous permettent pas d'aborder le problème de la gestion patrimoniale dans sa globalité. Dans le contexte d'un patrimoine d'infrastructures de transport, dans un environnement urbain très dense et en relation étroite avec le fonctionnement de la ville, comme c'est le cas de la RATP, des contraintes autres que techniques conditionnent la programmation des travaux de maintenance. En effet, les actions de réhabilitation ne peuvent pas toujours se réaliser selon la priorisation établie par les indicateurs de performance. Les programmations sont conditionnées par le contexte social des ouvrages (par exemple, périodes électorales où les travaux ayant un fort impact sont limités), l'obtention des autorisations pour réaliser des travaux depuis la voirie, la limitation des ressources technico-économiques ou pour des raisons d'exploitation du système de transport. La gestion patrimoniale est donc un problème multicritère où les aspects socio-économiques jouent un rôle très important dans la hiérarchisation des actions de maintenance. Dans ce contexte, ils doivent être considérés avec les aspects techniques afin d'avoir une vision complète du problème de la gestion patrimoniale.***

Nous avons identifié différentes méthodes de gestion patrimoniale dans le domaine du génie civil. Ces méthodes sont basées sur l'évaluation de l'état structurel des ouvrages et complétées par des critères de gestion relatifs au coût des opérations de maintenance, à l'environnement ou à la stratégie politique du maître d'ouvrage. Tel est le cas de la méthode VSC (Visite Simplifiée Comparée) (Fauchoux et *al*., 2006) qui introduit des critères socio-économiques et les croise avec l'évaluation technique de l'ouvrage pour obtenir une programmation des travaux optimisée. Cette méthode a été appliquée, parmi d'autres exemples, au parc d'ouvrages portuaires (Fauchoux et *al*., 2011).

Dans cette même optique, pour la gestion des réseaux d'assainissement, la méthode CARE-W (Le Gauffre et *al*., 2002) et le guide RERAU (Le Gauffre et *al*., 2004b) pour la (REhabilitation des Réseaux d'Assainissement Urbain) proposent une méthodologie de gestion basée sur le développement d'indicateurs de performance et de critères de décision pour la programmation d'actions de surveillance et de réhabilitation. Ces critères de décision tiennent compte des aspects structurels, fonctionnels et environnementaux du réseau dans son ensemble.

Dans un contexte d'infrastructures de transport, nous avons identifié également des méthodes multicritère pour optimiser la gestion patrimoniale. Leur principe est aussi basé sur l'aspect multicritère de la gestion, où l'évaluation technique des ouvrages est complétée par les critères de nature socio-économique et de fonctionnement global du système de transport. La construction des critères de décision est réalisée à partir de la formalisation de l'expertise. La combinaison des critères est réalisée en fonction des stratégies des gestionnaires (SETRA, 2006) ou déterminée par des méthodes multicritère simples comme la moyenne pondérée (Sanchez, 2007).

***Au vu de ce que montrent ces exemples, on peut considérer que deux aspects fondamentaux interviennent dans la gestion du patrimoine :***

- ***l'évaluation de la performance (au moyen d'indicateurs) ;***
- ***la décision multicritère pour l'établissement des priorités et définition des actions de maintenance.***

***Afin de développer un outil optimisé pour la gestion du patrimoine de la RATP, nous proposons d'améliorer l'évaluation de la performance par l'application des méthodes de la Sûreté de Fonctionnement. Ces méthodes nous permettront d'obtenir une modélisation fonctionnelle des mécanismes de dégradation des ouvrages. Ensuite, nous appliquons les méthodes multicritère pour construire un indicateur de performance à partir de cette modélisation. En outre, les méthodes multicritère nous permettront de formaliser sous la forme de critères de décision les différents aspects socio-économiques qui interviennent dans la gestion du patrimoine et de développer un outil d'aide à la décision multicritère. Cette démarche sera présentée dans le Chapitre 3.***

# Chapitre 3. Proposition d'une démarche scientifique d'amélioration de la gestion des ouvrages de la RATP

## 3.1 *Contexte*

Nous avons dressé un panorama du patrimoine d'infrastructures de la RATP. Ce parc d'ouvrages est très hétérogène à différents points de vue : types d'infrastructures, techniques de construction, matériaux employés, environnement géologique, dates de construction, etc.

Il est apparu que les tunnels en maçonnerie constituent la grande majorité des linéaires. De plus, cette famille d'ouvrages présente les mêmes caractéristiques, du point de vue de sa gestion, que le patrimoine dans sa globalité : ce sont des ouvrages hétérogènes et anciens pour lesquels les exigences de service augmentent régulièrement, la surveillance est fondée sur des évaluations visuelles et l'historique des ouvrages n'est bien répertorié que depuis une dizaine d'années. Dans ce contexte, les gestionnaires élaborent la programmation de travaux de maintenance sur la base de leur expertise.

Pour ces raisons, nous allons focaliser notre étude sur les tunnels maçonnés. La méthode élaborée aura vocation à être déployée par la suite sur les autres types d'ouvrages de la RATP : tranchées couvertes, viaducs métalliques, etc.

Lors de notre recherche bibliographique sur les différents modes de gestion patrimoniale, nous avons constaté que la pratique de la maintenance des ouvrages de génie civil se fonde essentiellement sur des mesures de surveillance, régies le plus souvent par une réglementation. Cette surveillance comprend des techniques d'inspection pour lesquelles on retrouve un cadre commun aux différents ouvrages de génie civil : les visites régulières visuelles, réalisées une ou plusieurs fois par an (visant à détecter des anomalies dans le cadre d'une maintenance préventive), et les inspections détaillées effectuées avec une fréquence pluriannuelle (grosse maintenance). Ce type de surveillance, fondée sur des inspections visuelles, donne des résultats variables et, parfois, imprécis.

Ces actions peuvent éventuellement être renforcées par la haute surveillance en cas de sollicitations accidentelles, de dégradations évolutives ou de risque imminent. Mais cette information, bien que plus précise, est de caractère ponctuel et ne peut pas être extrapolée à la globalité du patrimoine.

A partir de ces résultats, les gestionnaires doivent définir les programmes de travaux de réhabilitation. Deux types de questions se posent en termes de stratégie de gestion patrimoniale :

- Comment justifier les actions à réaliser (la justification peut être absolue ou relative, on parle alors de hiérarchisation) ? ;
- Comment optimiser le choix d'une série d'actions (programmation) dans un environnement de contraintes techniques et budgétaires ?

Actuellement, les réponses à ces questions sont données à partir de l'expertise des gestionnaires et, dans la plupart des cas, ne sont pas formalisées.

Préserver une régularité des actions de maintenance, tout en préservant une amélioration des performances du parc constitue un des objectifs principaux de la gestion des ouvrages. Il ne suffit donc pas de renforcer ou de réparer les seuls ouvrages inadéquats à un instant donné, il faut aussi mettre en œuvre les actions préventives là où elles sont nécessaires afin d'éviter des problèmes financiers et logistiques futurs. Pour cela, il est essentiel de disposer d'une méthodologie de gestion qui ne se contente pas de considérer un ouvrage ou un patrimoine à un instant donné, mais de tenir compte de son évolution future et les actions de prévention susceptibles d'être menées. Cela doit permettre de définir de manière rationnelle la maintenance à appliquer, en tenant compte des coûts futurs de gestion. Dans les cas des maintenances préventive et conditionnelle, le moment d'intervention choisi a une importance considérable sur le plan du maintien de la performance et sur le plan économique. L'analyse nécessite donc de bien connaître les coûts d'intervention et d'inspection, mais de savoir aussi anticiper le comportement futur avec ou sans interventions. Cette optimisation est souvent d'une grande complexité numérique et, dans ce contexte, des simplifications s'avèrent nécessaires.

## 3.2 *Objectifs*

L'objectif de notre recherche est d'améliorer la gestion du patrimoine de la RATP. Mais la gestion patrimoniale étant un domaine très vaste, elle peut être améliorée dans différents axes:

- Optimisation des programmes d'inspection ;
- Amélioration des modèles d'évolution de vie des ouvrages ;
- Amélioration des techniques de réhabilitation…

Aborder tous ces aspects serait un objectif trop ambitieux qui dépasserait largement le cadre d'une thèse doctorale.

***Notre recherche se focalise donc dans l'élaboration d'un outil d'aide à la décision permettant aux gestionnaires de la RATP de prendre et de justifier les meilleures décisions pour définir une programmation de travaux de maintenance optimisée ; cet outil tiendra compte du cycle de vie des ouvrages, de l'agressivité de l'environnement provoquant leur dégradation et des différentes contraintes socio-économiques et urbaines intervenant dans la gestion du patrimoine.***

Les questions pratiques auxquelles on souhaite répondre sont :

- Quel est le budget nécessaire pour assurer la sécurité, la capacité de service et la pérennité du patrimoine d'infrastructures de la RATP ?
- Comment élaborer une programmation des travaux de maintenance pour obtenir, à partir des ressources disponibles, le meilleur bénéfice sur l'état global du patrimoine ?
- Comment évaluer l'effet des actions de maintenance sur le cycle de vie des ouvrages ?

Le présent travail de thèse est réalisé dans un cadre de collaboration CIFRE. Il est donc évident qu'il doit aboutir à des méthodes opérationnelles exploitables par les gestionnaires de la RATP.

## 3.3 *Questions scientifiques*

***Notre recherche doit permettre le développement d'un outil d'aide à la décision qui tient compte des caractéristiques du patrimoine, des données disponibles issues des activités de surveillance visuelle, de la limitation des ressources technico-économiques et des cycles de vie des ouvrages.***

Les questions scientifiques inhérentes à cet objectif sont les suivantes :

- Comment modéliser les mécanismes de dégradation des tunnels maçonnés de la RATP et identifier les indicateurs des phénomènes en cause ?
- Comment évaluer le niveau de performance du patrimoine à partir des résultats issus des inspections visuelles ?
- Comment identifier les critères de décision qui intègrent l'ensemble de dimensions considérées par le gestionnaire dans la configuration des programmes de maintenance ?
- Comment construire un modèle d'aide à la décision multicritère permettant de prendre et de justifier les décisions des gestionnaires ?

## 3.4 *Démarche Scientifique*

Pour donner des réponses à chacune de ces questions, nous définissons une démarche scientifique en nous appuyant sur des méthodes de gestion patrimoniale déjà existantes que nous avons identifiées grâce à l'analyse de l'état de l'art. Cette démarche se base sur trois étapes fondamentales : *la modélisation des mécanismes de dégradation des ouvrages, l'évaluation de la performance et l'aide à la décision multicritère* (fig. 3-1).

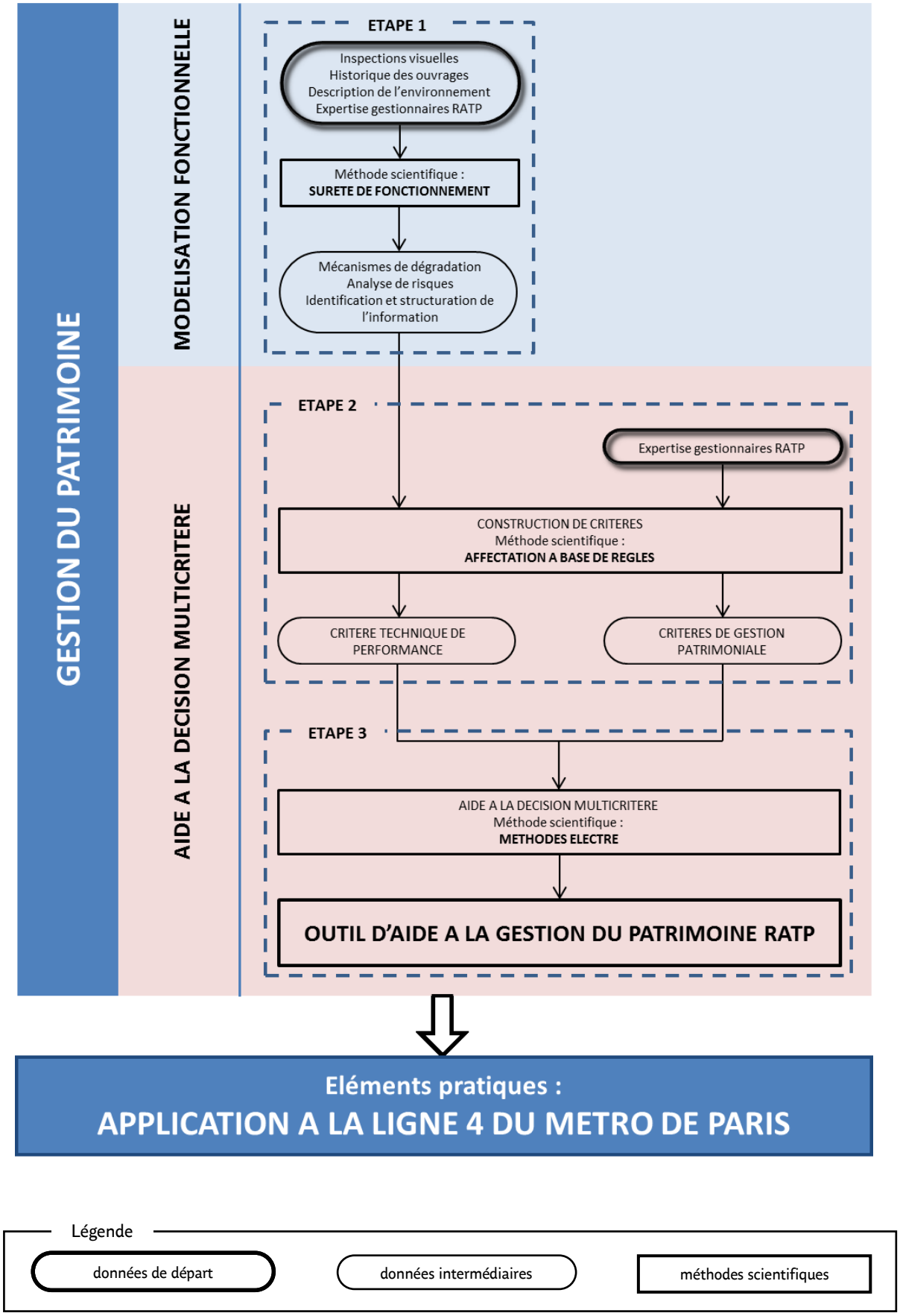






*Figure 3-1: Démarche scientifique proposée*

***Etape 1***

La présentation du patrimoine que nous avons réalisée dans le Chapitre 1 met en évidence l'hétérogénéité des environnements et des types d'ouvrages, ainsi que la variabilité des informations issues des inspections visuelles. Dans ce contexte, il est nécessaire de développer une méthode d'évaluation de la performance adaptée aux caractéristiques des ouvrages de la RATP et de l'information disponible. Pour ce faire, il est nécessaire, dans un premier temps, de développer une méthode pour la modélisation, la représentation et l'analyse des mécanismes de dégradation des ouvrages de la RATP.

***Dans cette étape, nous proposons l'application des méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement pour modéliser le fonctionnement et les mécanismes de dégradation des tunnels en maçonnerie. Cette analyse permettra d'identifier les mécanismes de dégradation des ouvrages, leurs causes et leurs effets, et d'évaluer les risques qui affectent les infrastructures (fig. 3-2). Ces résultats permettront d'identifier et de structurer l'information à partir de laquelle nous construirons un critère de « performance » dans l'étape suivante.***

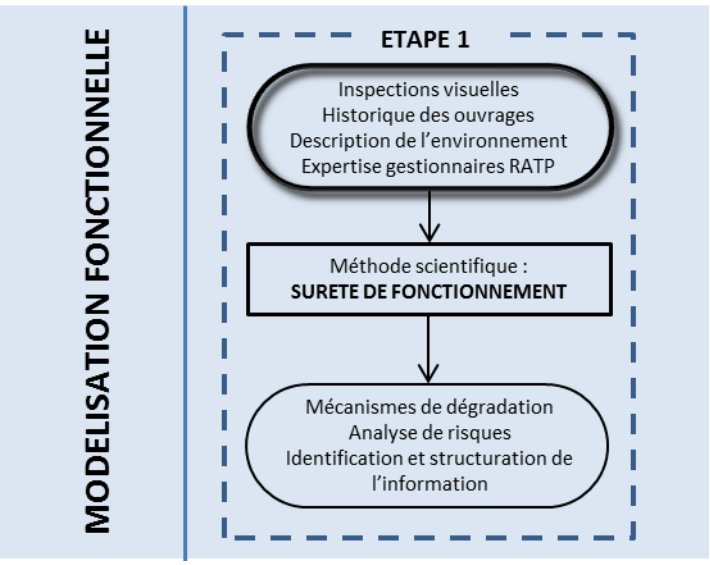



*Figure 3-2: Modélisation fonctionnelle pour la construction d'un critère de performance*

***Etape 2***

La seconde étape consiste à décrire notre problème d'aide à la décision multicritère en terme scientifique. Il s'agira notamment de construire une famille de critères modélisant fidèlement le problème de gestion patrimoniale de la RATP.

***Nous proposons tout d'abord de construire un critère de performance qui synthétise l'état structurel de l'ouvrage et la globalité des aspects techniques considérés par les gestionnaires de la RATP. Pour ce faire, nous nous appuyons sur la modélisation fonctionnelle obtenue dans l'étape 1 et la méthode de l'affectation à base de règles (Azibi, 2003).***

***Ce critère de performance est ensuite complété par d'autres critères qui représentent la globalité des aspects économiques, de fonctionnement du réseau et des contraintes externes qui interviennent dans la gestion patrimoniale de la RATP. Leur construction se fonde sur l'expertise des gestionnaires de la RATP et s'appuie également sur la méthode de l'affectation à base de règles (Azibi, 2003) (fig. 3-3).***

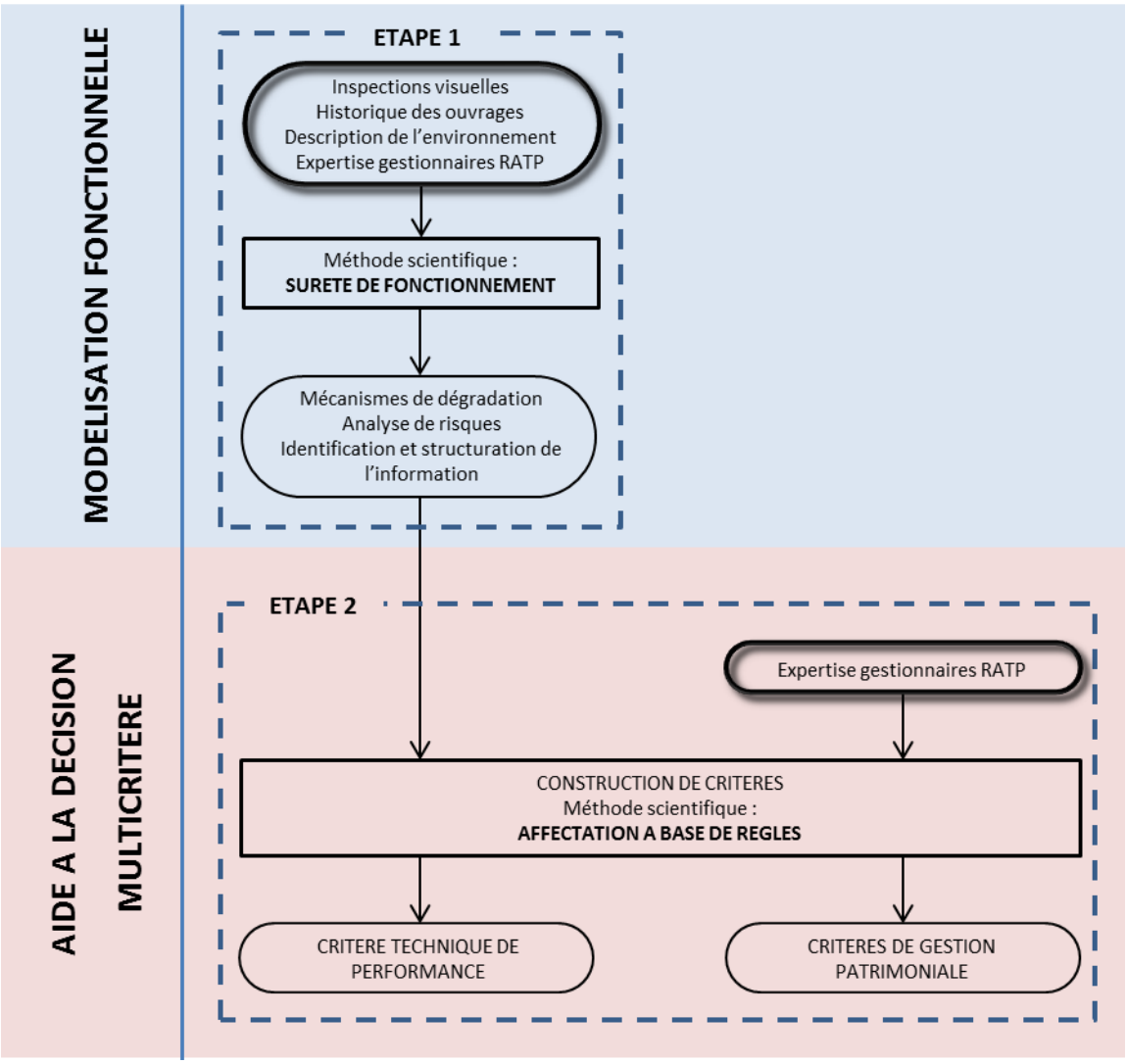



*Figure 3-3: Méthodologie pour la construction d'une famille cohérente de critères de décision*

***Etape 3***

***A partir de la famille cohérente de critères de décision obtenue (critères techniques et critères de gestion patrimoniale), nous proposons l'application des outils multicritère d'aide à la décision, méthodes ELECTRE, pour élaborer un outil d'aide à la gestion du patrimoine RATP (fig. 3-4).***

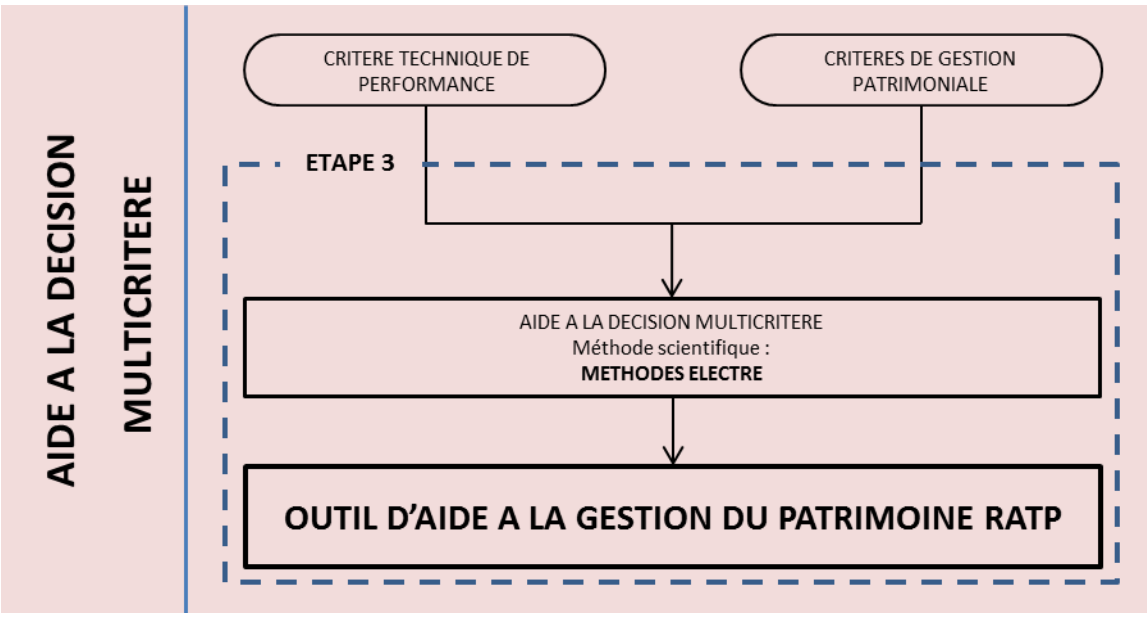



*Figure 3-4: Méthodologie pour la construction d'un outil d'aide à la gestion du patrimoine RATP*

Dans la suite du mémoire (Partie II), nous présentons les outils scientifiques dont nous nous servirons dans cette démarche scientifique : les outils de la Sûreté de Fonctionnement (Chapitre 4) et les méthodes multicritère d'aide à la décision (Chapitre 5).

Dans la Partie III, la démarche pour élaborer un outil d'aide à la gestion de la RATP sera développée. Dans le Chapitre 6, nous présentons l'application des outils de la Sûreté de Fonctionnement pour bâtir un modèle fonctionnel des mécanismes de dégradation des tunnels maçonnés de la RATP (étape 1). Le Chapitre 7 sera consacré à la construction d'un critère de performance à partir des résultats du chapitre précédent, et à la construction du reste de critères de décision à partir de la formalisation de l'expertise (étape 2). Le Chapitre 8 présente la construction de l'outil multicritère d'aide à la gestion du patrimoine de la RATP (étape 4).

Enfin, nous consacrons la Partie IV à l'application de notre démarche sur la ligne 4 du métro de Paris. Après une présentation de la ligne 4 (Chapitre 9), nous détaillons la mise en œuvre du modèle et réalisons l'analyse des résultats obtenus (Chapitre 10).

| | | | |
|---|---|---|---|
| Présentation des méthodes scientifiques | Sûreté de Fonctionnement | Partie II | chapitre 4 |
| | Méthodes multicritère d'aide à la décision | | chapitre 5 |
| Etape 1 | Modélisation fonctionnelle des mécanismes de dégradation des tunnels maçonnés de la RATP | Partie III | chapitre 6 |
| Etape 2 | Construction d'une famille de critères de décision pour la gestion du patrimoine de la RATP | | chapitre 7 |
| Etape 3 | Construction d'un outil multicritère d'aide à la gestion du patrimoine RATP | | chapitre 8 |
| Présentation du cas d'étude | Présentation de la ligne 4 | Partie IV | chapitre 9 |
| Application et analyse | Application ligne 4. Analyse des résultats et discussion | | chapitre 10 |

*Tableau 3-1 : Synthèse des méthodes utilisées dans le cadre de notre recherche*

# Partie II
# Eléments de réponse théoriques : présentation et choix des méthodes

# Introduction de la Partie II

Cette partie présente les méthodes scientifiques proposées pour le développement d'un outil d'aide à la gestion du patrimoine de la RATP : la Sûreté de Fonctionnement et les méthodes multicritère d'aide à la décision.

Le Chapitre 4 expose les principes théoriques de la Sûreté de Fonctionnement et dresse un panorama des méthodes existantes. Ensuite, une justification des méthodes retenues pour la modélisation fonctionnelle des mécanismes de dégradation des tunnels maçonnés de la RATP est proposée.

Le Chapitre 5 est consacré aux méthodes d'aide à la décision multicritère. Dans un premier temps, les concepts et les définitions de base sont introduits avant de formuler le problème de la gestion du patrimoine de la RATP selon les termes de l'aide à la décision multicritère. Dans un deuxième temps, ce chapitre présente les différentes méthodes applicables pour la construction de critères de décision et le développement d'un outil d'aide à la décision. Une démarche est proposée pour choisir les méthodes les plus adaptées selon les contextes d'application.

# Chapitre 4. La Sûreté de Fonctionnement comme méthode pour modéliser le fonctionnement des systèmes complexes

Comme indiqué dans le Chapitre 3, un des objectifs de notre démarche scientifique est d'obtenir une évaluation de la performance des ouvrages qui englobe tous les aspects techniques intervenant dans la gestion patrimoniale de la RATP. Cette évaluation doit être réalisée à partir de l'information disponible. C'est-à-dire : les données issues des inspections visuelles, l'historique des ouvrages et la description de l'environnement. Pour atteindre cet objectif, il est essentiel de connaitre comment les ouvrages de la RATP fonctionnent, se dégradent et interagissent avec leur environnement. A cet effet, nous proposons une démarche scientifique s'appuyant sur l'application de méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement.

Ces méthodes ont été conçues à l'origine pour étudier les systèmes industriels au fonctionnement complexe (nombre de composants très important, défaillances multiples et bouclées…) pour lesquels il est très difficile, voire impossible, de produire un modèle de fonctionnement par des approches physiques classiques (Villemeur, 1988). Ces méthodes ont été déjà employées avec succès en génie civil ; on cite en particulier les digues (Serre, 2005), (Vuillet, 2012), les produits constructifs du bâtiment (Talon et *al.*, 2007), la construction des tranchées couvertes en milieu urbain (Paterna, 2009), les dispositifs de protection contre les crues torrentielles (Ghariani, et *al.* 2014), etc.

Un système complexe est composé d'un grand nombre d'éléments qui interagissent entre eux de façon non linéaire (Simon, 1991) et dans lequel les relations de cause à effet ne sont pas toujours établies scientifiquement et nécessitent une part d'intuitif. Pour les tunnels maçonnés, et plus généralement pour l'ensemble des infrastructures composant le patrimoine de la RATP, nous sommes face à des systèmes complexes, car confrontés à des processus physiques complexes, redondants, progressifs et faisant intervenir de nombreuses interactions avec le milieu extérieur. Ainsi, nous identifions les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement comme bien adaptées pour la modélisation du fonctionnement et des mécanismes de dégradation des tunnels maçonnés de la RATP.

Dans ce chapitre nous introduisons les outils de la Sûreté de Fonctionnement en nous basant sur la synthèse réalisée par (Serre, 2005). Ensuite, nous justifions, dans le cadre de notre problématique, l'intérêt d'appliquer ces méthodes pour modéliser le fonctionnement des ouvrages de la RATP.

## 4.1 *L'Analyse Fonctionnelle (AF)*

Dans un contexte de maintenance préventive, le diagnostic de l'état de dégradation des ouvrages est essentiel pour anticiper les éventuelles défaillances. Il n'existe pas de liste exhaustive de modèles liant les causes et les effets de ces défaillances. C'est la raison pour laquelle les méthodes de diagnostic sont nombreuses :

- Celles basées sur la modélisation complète des défaillances et des dégradations ;
- Celles basées sur les connaissances des experts sans modélisation des mécanismes de propagation des dégradations (Zwingelstein, 1995).

Les méthodes de diagnostic de défaillances basées sur les techniques de modélisation reposent sur les méthodes de modélisation physique des systèmes ou sur des méthodes issues de l'analyse fonctionnelle. La modélisation physique implique une connaissance approfondie du système et sa représentation sous la forme de modèles physiques et mathématiques, appuyés par la simulation numérique. Ce type de modélisation n'est pas applicable au patrimoine de la RATP, de par l'hétérogénéité de ses infrastructures et des caractéristiques des données disponibles (du faite de leur insuffisance, leur incomplétude ou leur nature même) (Talon, et *al.* 2014). L'analyse fonctionnelle, qui elle s'appuie sur les fonctions d'un système pour comprendre son fonctionnement et établir, de façon systématique et exhaustive, les relations fonctionnelles à l'intérieur et à l'extérieur d'un système, lui est plus adaptée.

Il est donc important de bien définir la notion de « fonction ». Selon la norme NF X50-150, une fonction est définie comme les « *actions d'un produit ou de l'un de ses constituants exprimées en terme de finalité* ». L'analyse fonctionnelle est une démarche (fig. 4-1) qui consiste à recenser, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions d'un système.

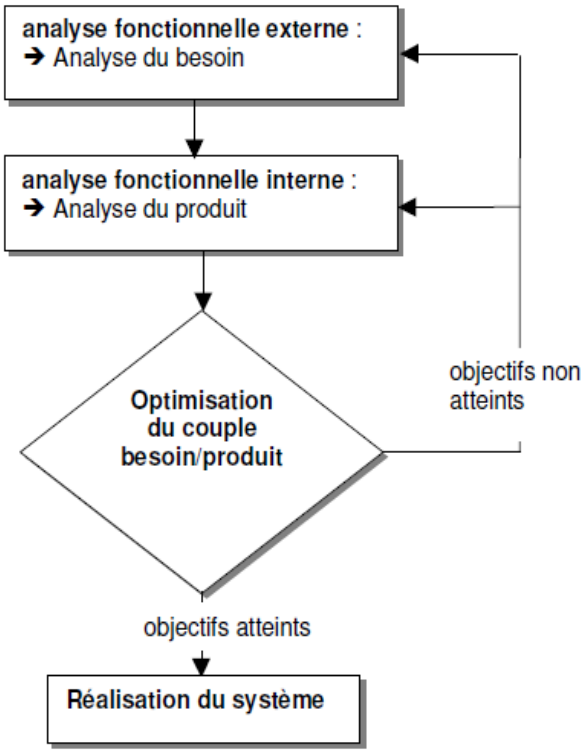



*Figure 4-1 : Démarche générale de l'Analyse Fonctionnelle (Peyras, 2003)*

Plusieurs méthodes d'analyse fonctionnelle existent et sont liées aux fonctionnalités du système à étudier. On distingue trois familles (Zwingelstein, 1996) :

- L'analyse fonctionnelle tirée des techniques d'analyse de la valeur : normes NF X50-150 à X50-153 ; RELIASEP (Pitton, 1996) ; méthodes FAST (Zwingelstein, 2009), APTE (Zwingelstein, 1996) ;
- L'analyse fonctionnelle appliquée à l'informatique et aux logiciels : SADT (Ross et Scholman, 1977) et IDEF-0 ;
- L'analyse fonctionnelle appliquée aux organisations : méthode MERISE (Hubert et *al*, 2003).

Dans le domaine des systèmes mécaniques (tels les tunnels en maçonnerie), l'expérience tirée de l'utilisation des différentes méthodes a montré que les méthodes d'analyse de la valeur, bien que d'application générale, sont particulièrement adaptées (Peyras, 2003). Elles ont comme applications récentes :

- Les digues de protection contre les inondations, (Serre, 2005), (Vuillet, 2012) ;
- Les produits constructifs du bâtiment (Talon et *al*., 2007) ;
- Les barrages (Brandon et *al*., 2008), (Dieudonné, et *al*., 2014) ;
- La construction des tranchées couvertes en milieu urbain (Paterna, 2009) ;
- Les dispositifs de protection contre les crues torrentielles (Ghariani, et *al.* 2014).

Une démarche pour choisir la méthode d'analyse fonctionnelle la plus adaptée en fonction du système à analyser est proposée par (Ghariani et *al.*, 2014). Elle est basée sur l'adaptation des caractéristiques du système avec celles de la méthode d'analyse fonctionnelle. Selon cette démarche de sélection, la méthode APTE s'avère comme la plus adaptée pour analyser les systèmes complexes qui sont en interaction avec un milieu extérieur et en phase de service, ce qui est le cas des infrastructures du patrimoine de la RATP.

Nous proposons donc d'appliquer une démarche d'analyse fonctionnelle basée sur la méthode APTE. La méthode APTE (APplication des Techniques d'Entreprises), développée par le cabinet conseil APTE, est l'une des plus utilisées en Sûreté de Fonctionnement, généralement employée en vue d'une analyse des modes de défaillance ultérieure. Cette analyse se décompose en deux parties principales : l'analyse fonctionnelle externe et l'analyse fonctionnelle interne (fig. 4-2) :

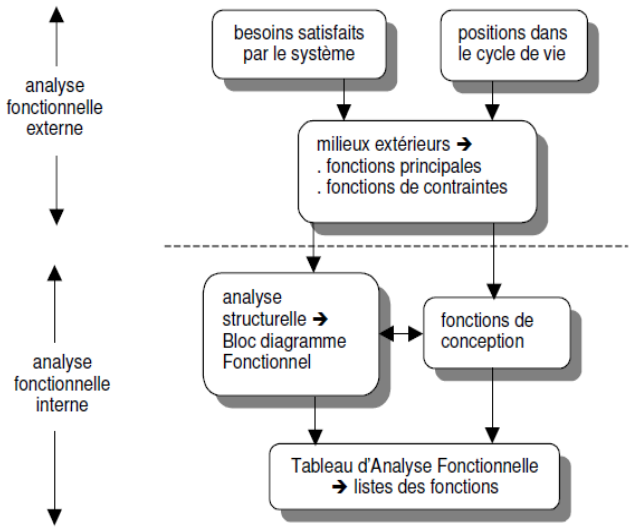



*Figure 4-2 : Processus de l'analyse fonctionnelle (Peyras, 2003)*

***L'analyse fonctionnelle externe*** comprend la mise en évidence du besoin satisfait par le système (cycle de vie, cas d'utilisation), la recherche des milieux extérieurs (particuliers au système, propres au milieu environnant ou à l'exploitation du système…) et l'identification des fonctions de service et de contraintes. Cette analyse étudie les interactions du système avec les milieux environnants. Il est donc nécessaire de définir précisément ses limites et les milieux extérieurs en interaction. L'analyse fonctionnelle externe permet un recensement plutôt exhaustif des milieux environnant le système, que ce soit en termes d'occupations humaines, d'autres types d'infrastructures (routières, réseaux concessionnaires, etc.), d'environnement naturel, et des enjeux potentiels ou facteurs agresseurs. (Dieudonné, 2014).

***L'analyse fonctionnelle interne***, qui comprend l'analyse structurelle du système. Elle permet de définir les positions et les relations des différents composants du système. Il est ainsi possible de formuler les fonctions de chaque composant : contact et flux (Zwingelstein, 1996).

La méthode APTE met en œuvre des outils puissants de l'analyse fonctionnelle : le Bloc diagramme Fonctionnel et le Tableau d'Analyse Fonctionnelle (Zwingelstein, 1996).

Le Bloc diagramme Fonctionnel (BdF) est une représentation du système et des milieux extérieurs qui met en évidence (fig. 4-3) :

- Les interactions entre les composants du système et les milieux extérieurs ;
- Les interactions entre les composants eux-mêmes ;
- Les circulations des flux à travers ou à l'intérieur du système et ses composants.

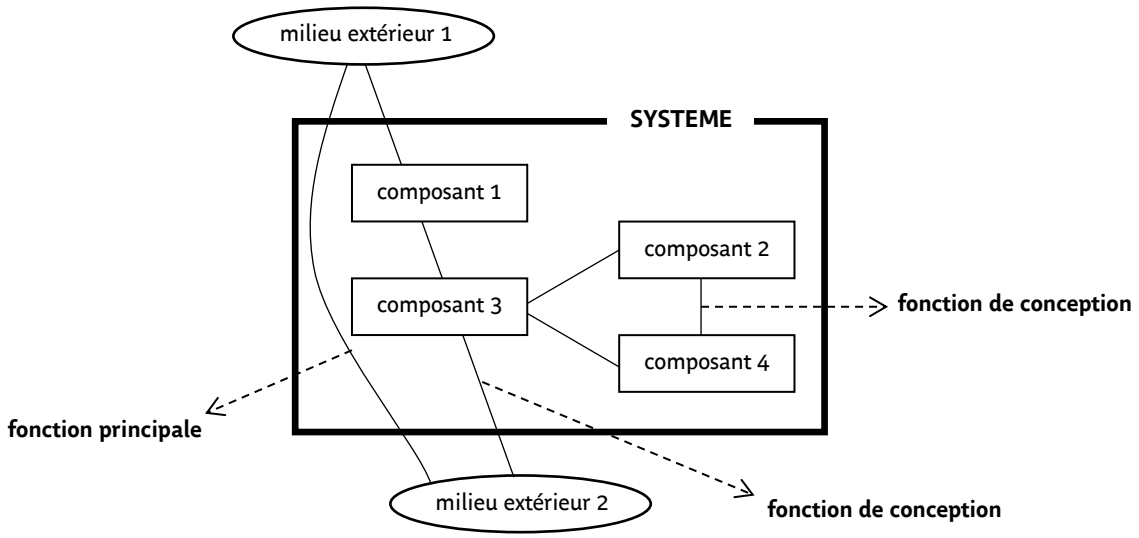



*Figure 4-3 : BdF appliqué à un système de quatre composants (Zwingelstein, 1996)*

Le BdF permet d'identifier les fonctions principales du système en examinant les flux mettant en relation deux milieux extérieurs via le système, et les fonctions de conception des composants en examinant les interactions entre les composants du système et les milieux extérieurs, et entre les composants eux-mêmes.

Le Tableau d'Analyse Fonctionnelle (TAF) découle de l'analyse du BdF. Il rassemble, d'une part, les fonctions principales du système, d'autre part, les composants et leurs fonctions de conception (tab. 4-1).

| | | Fonction principale | Fonction de conception |
|---|---|---|---|
| Composants du système | n° 1 | | |
| | n° 2 | | |
| | … | | |
| | n° N | | |

*Tableau 4-1 : Structure d'un Tableau d'Analyse Fonctionnelle (Zwingelstein, 1996)*

***L'Analyse Fonctionnelle est essentielle à l'application d'une méthode d'Analyse des Modes de Défaillance et leurs Effets puisqu'elle recense de manière exhaustive tous les éléments du système (Analyse Structurelle), les interactions du système avec le milieu extérieur (Analyse Fonctionnelle Externe) et les interactions de chaque composant du système entre eux et avec l'environnement extérieur (Analyse Fonctionnelle Interne). Elle aboutit à la liste des fonctions principales du système et aux fonctions de conception des composants.***

## 4.2 *L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE)*

L'Analyse des Modes de Défaillance et leurs Effets (AMDE) est une méthode inductive d'analyse des défaillances potentielles d'un système. Elle est une des méthodes de la Sûreté de Fonctionnement qui ont été développées à l'origine pour étudier des systèmes industriels au fonctionnement complexe (nombre de composants très important, défaillances multiples et bouclées…) pour lesquels il est très difficile, voire impossible, de produire un modèle de fonctionnement par des approches physiques classiques.

Dès son apparition dans les années 1960 dans l'aéronautique, elle a été utilisée dans l'industrie (spatiale, nucléaire, automobile…) et depuis la fin des années 1990 dans différents domaines du génie civil : les digues (Serre, 2005), (Vuillet et *al*, 2014), les produits constructifs du bâtiment (Talon et *al.*, 2007), la construction des tranchées couvertes en milieu urbain (Paterna, 2009), les dispositifs de protection contre les crues torrentielles (Ghariani, 2014)… Cette méthode fait l'objet de nombreux guides et normes, généralement mis au point pour chaque contexte particulier.

Comme méthode inductive, elle considère systématiquement, l'un après l'autre, chaque composant du système et analyse, pour chaque fonction accomplie par les composants, leurs modes de défaillance susceptibles d'apparaître aux différents cycles de la vie de l'ouvrage, leurs causes et leurs effets (Villemeur, 1998). Un mode de défaillance est défini comme la non réalisation d'une fonction quelconque dans des conditions prévues : non fonctionnement, perte ou dégradation d'une fonction, fonction intempestive, et leurs effets (ISDF).

L'AMDE comprend généralement trois analyses :

- **l'AMDE Produit** est en principe réalisée en première phase : elle vérifie que le système assure en phase d'exploitation de façon satisfaisante les fonctions pour lesquelles il est conçu ;
- **l'AMDE Processus** examine si le produit obtenu est bien conforme à ce qui est prévu. Elle identifie les modes de défaillance liés à la conception et à la réalisation du système ;
- **l'AMDE Moyen** est plus rarement réalisée pour rechercher les moyens à mettre en œuvre.

***Dans un contexte de gestion de patrimoine, on s'intéresse uniquement aux ouvrages en service. Dans notre recherche, nous allons appliquer l'AMDE aux tunnels maçonnés en phase d'exploitation (on vise à optimiser la maintenance des ouvrages en service. L'amélioration de la conception ou de la construction des tunnels ne concerne pas notre recherche). Les défaillances d'un ouvrage en service peuvent provenir d'une part, de défauts introduits lors des phases de conception-réalisation (méthode franco-belge pour le cas des tunnels maçonnés de la RATP (Chapitre 1)) et, d'autre part, du vieillissement inéluctable des différents composants. Dans ce contexte, nous allons recourir à l'AMDE Processus pour recenser les causes des défaillances liées à la conception-réalisation, et à l'AMDE Produit pour identifier les causes et les effets des défaillances potentielles lors de l'exploitation du système.***

### *4.2.1 Les applications récentes de l'AMDE en génie civil*

L'AMDE a été utilisée depuis la fin des années 1990 dans différents domaines du génie civil : les bâtiments, les routes, les digues, les barrages, etc. Cette méthode est au cœur de l'activité scientifique et technique et les exemples d'application que l'on peut identifier dans le domaine du génie civil sont de plus en plus divers.

Dans le domaine des barrages, (Dieudonné, 2014) présente un retour d'expérience de la pratique des études de dangers des barrages en France. Dans ce contexte, (Brandon et *al*., 2008) propose l'application de l'AMDE pour la réduction des risques à travers d'une amélioration de la Sûreté de Fonctionnement des barrages. L'application de l'AMDE permet d'identifier les causes et les conséquences des désordres affectant les composants des barrages et sert de base pour identifier les scénarios critiques.

Dans le domaine des ouvrages de protection contre les crues torrentielles, les outils de la Sûreté de Fonctionnement ont été appliqués pour assurer l'efficacité des dispositifs de protection face aux phénomènes torrentiels (Ghariani, 2014). Le maintien de l'efficacité de ces dispositifs est une préoccupation majeure des maîtres d'ouvrage et gestionnaires pour atteindre de manière pérenne les objectifs de réduction des risques. Il est donc important de produire des méthodes et des outils d'évaluation de l'efficacité de ces dispositifs. Ceci suppose que leur fonctionnement et leurs dysfonctionnements soient connus. Dans ce contexte, l'AMDE est appliquée pour analyser les dysfonctionnements possibles des dispositifs de protection. Ensuite, l'enchaînement des dégradations des fonctions permet d'identifier les différents scénarios conduisant à la défaillance.

### *4.2.2 Les applications récentes de l'AMDE en infrastructures de transports*

Dans le domaine des infrastructures de transports, nous citons le projet ANR MéDiTOSS (Méthodologie de Diagnostic des Tunnels et Ouvrages Souterrains en Service). Le principal objectif de ce projet est le développement d'une méthodologie de diagnostic de l'état structurel des tunnels basée principalement sur des méthodes non destructives. Cette méthode consiste à intégrer de nouveaux outils d'auscultation (géoradar, pénétromètre dynamique léger géo-endoscope et impédance mécanique) pour améliorer la caractérisation de l'état mécanique et géométrique des tunnels.

Dans ce cadre, un des objectifs de ce projet est de proposer une nouvelle démarche de notation, basée sur la méthodologie de diagnostic MéDiTOSS, permettant de minimiser la subjectivité inévitable des méthodes d'inspection visuelles (Chapitre 1). Dans ce contexte, (Rhayma, 2013) propose, dans un premier temps, l'application des outils de la Sûreté de Fonctionnement sur les tunnels maçonnés de la RATP. Cela permet d'identifier le fonctionnement de ce type d'ouvrages et les liens entre causes et conséquences des pathologies affectant les tunnels maçonnés.

Ces résultats servent de base pour construire, dans un second temps, le nœud papillon (Mortureux, 2002), (Lewis et Smith, 2010) qui permet de visualiser, d'un côté, les enchaînements de causes pouvant conduire à la dégradation des tunnels et, de l'autre côté, les décisions en termes de notation qui en découlent (fig. 4-4) :

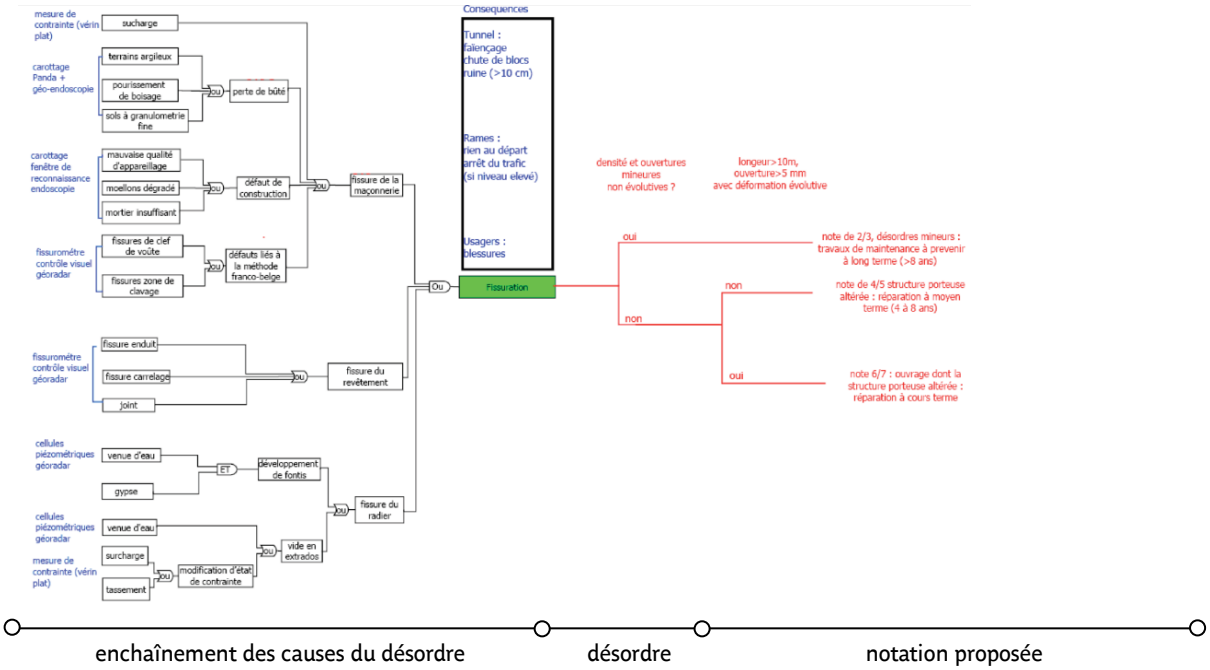



*Figure 4-4 : Nœud papillon de la pathologie « fissuration » (Rhayma, 2013)*

### 4.2.3 *Synthèse de l'AMDE*

L'AMDE est une méthode puissante pour améliorer la Sûreté de Fonctionnement d'un système. Son intérêt principal réside dans sa capacité à identifier, de manière exhaustive, les causes et les effets des défaillances des systèmes. Elle permet donc de générer une base d'informations qui sert de support pour définir, améliorer, corriger et valider un produit tout le long de sa vie, depuis sa conception jusqu'à l'exploitation.

La recherche bibliographique a montré des applications intéressantes en génie civil dans différents types d'infrastructures, telles que les digues de contention (Serre, 2005), (Vuillet, 2012), les barrages (Dieudonné et *al.*, 2014), le bâtiment (Talon et *al.,* 2007), les tranchées couvertes en phase de chantier (Paterna, 2009), les infrastructures de transport (Rhayma, 2013), etc.

Dans le cas des tunnels en maçonnerie, on est face à un système complexe puisque nous sommes confrontés à des processus physiques complexes, redondants, progressifs et faisant intervenir de nombreuses interactions avec le milieu extérieur dans leur processus de dégradation et vieillissement. Dans ce contexte, l'AMDE se présente comme un outil bien adapté pour identifier les défaillances qui pourront mettre en question la sécurité et la capacité de service de ces ouvrages. Néanmoins, l'AMDE présente aussi des limites, comme par exemple, la difficulté à prendre en compte les phénomènes combinatoires ou redondants qui interviennent dans les processus de dégradation des systèmes complexes. C'est la raison pour laquelle l'AMDE est généralement suivie d'une méthode permettant de modéliser les scénarios de défaillance (Talon et *al.,* 2014).

## 4.3 *Méthodes de modélisation des scénarios de défaillance*

Le principe des méthodes de modélisation des défaillances fonctionnelles est d'établir, a priori et de manière formelle et exhaustive, les liens entre les causes initiales des défaillances et leurs effets afin d'obtenir une modélisation des scénarios de défaillance. Dans la suite du document, nous présentons les modèles qualitatifs et quantitatifs qui peuvent être appliqués dans notre problématique. Une synthèse présentant d'autres méthodes existantes est disponible en Annexe 1.

### *4.3.1 Les modèles qualitatifs*

Face à des systèmes complexes, il est difficile d'appréhender de façon exhaustive les relations internes par des variables et des équations. Il est donc nécessaire de se placer à un niveau d'abstraction élevé, pour intégrer toutes les connaissances hétérogènes relevant de différentes disciplines : c'est l'objet du raisonnement qualitatif (Dague *et al*. 2004).

Ainsi, le raisonnement qualitatif comprend tout ce qui concerne la description non numérique d'un système, en préservant ses propriétés comportementales majeures et en supprimant les détails. Le raisonnement à base de modèles (Model Based Reasoning) est un processus déductif mettant en œuvre des modèles qualitatifs. Il est utilisé pour prévoir, simuler et expliquer le comportement d'un système complexe, à partir du comportement et du fonctionnement de ses composants.

Dans le domaine de la Sûreté de Fonctionnement, et notamment lors de l'utilisation de l'AMDE on raisonne en termes de mode de défaillance. A chaque défaillance, une cause est associée à un effet : le raisonnement est donc causal. Parmi les différents modèles qualitatifs (Travé-Massuyès et *al.*, 1997), les modèles avec causalité explicite déclarent le sens de propagation des influences ou des valeurs, au moyen d'un graphe orienté ; ils permettent donc de prendre en compte ces liens de cause à effet. Cet aspect conduit quasiment naturellement à l'utilisation de graphes causaux (Travé-Massuyès et *al.*, 1997).

Nous présentons le modèle proposé par (Peyras, 2003), où les graphes causaux permettent de représenter les scénarios de dégradation à partir de séquences de défaillances (fig. 4-5) :

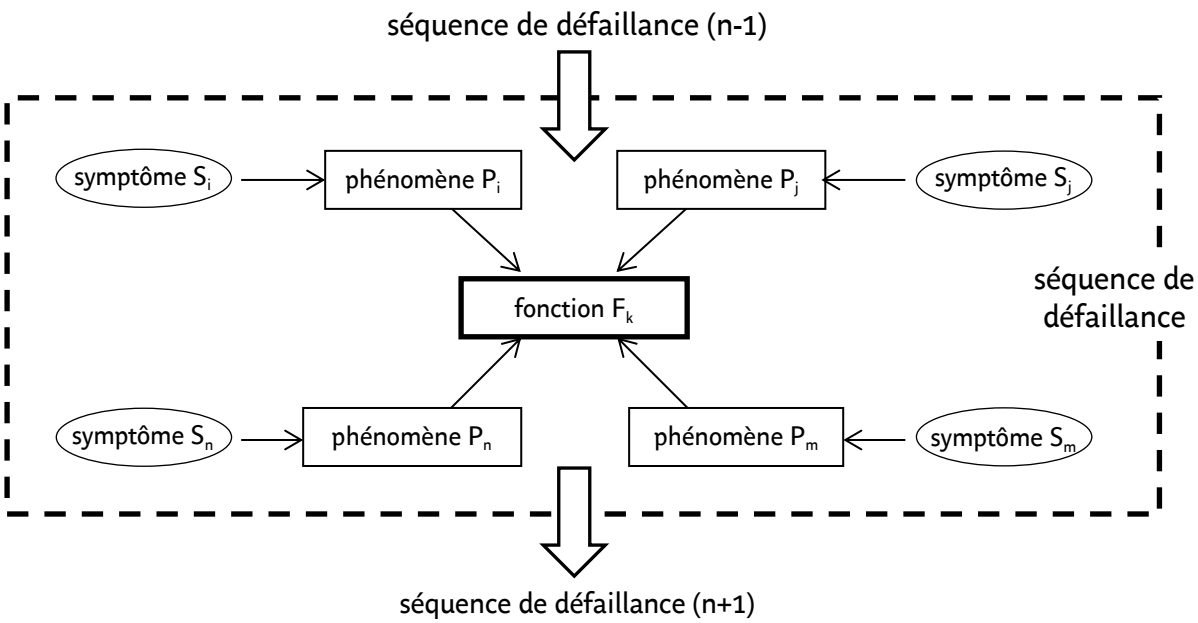



*Figure 4-5 : Schéma conceptuel pour la représentation des scénarios de dégradation (Peyras, 2003)*

Le modèle proposé consiste à construire les scénarios de dégradation du système en enchaînant les causes aux modes de défaillance, puis aux effets, ces derniers se traduisant par des symptômes.

Les scénarios de dégradation ainsi modélisés enchaînent des séquences chronologiques de défaillance, représentant les mécanismes physiques se produisant au sein du système et conduisant à des pertes ou à des dégradations de fonctions. Les séquences de défaillance sont déclenchées dès que les effets d'un mode de défaillance sont suffisamment importants pour devenir des causes d'un nouveau mode de défaillance.

Un tel modèle présente de nombreux avantages : il structure la connaissance experte sous forme de scénarios fonctionnels, il organise l'information liée au mécanisme autour de trois catégories de variables (fonction, phénomène et symptôme) et il permet de prendre en compte les dégradations partielles et progressives des variables et les mécanismes non chronologiques (Peyras, 2003).

### 4.3.2 *Les modèles quantitatifs*

Ces méthodes visent, outre l'identification des risques, à produire des mesures quantitatives de la Sûreté de Fonctionnement. Les principales sont la *Méthode de l'Arbre des Défaillances* (MAD) et la *Méthode des Arbres d'Evénements* (MAE).

D'autres méthodes sont destinées à simuler le fonctionnement dynamique d'un système : la Méthode de l'Espace des Etats, les réseaux de Petri stochastiques et les simulations de Monte Carlo. Elles sont présentées dans l'Annexe 1.

***La méthode des Arbres de Défaillances***

La *Méthode des Arbres des Défaillances*, est une méthode déductive : l'événement indésirable est situé au sommet de l'arbre et on déduit les événements intermédiaires et de base (fig. 4-6). Chaque niveau d'événements est relié en cascade à l'aide de symboles correspondant à des opérateurs qualitatifs (max, et, ou, si…) (Villemeur, 1988).

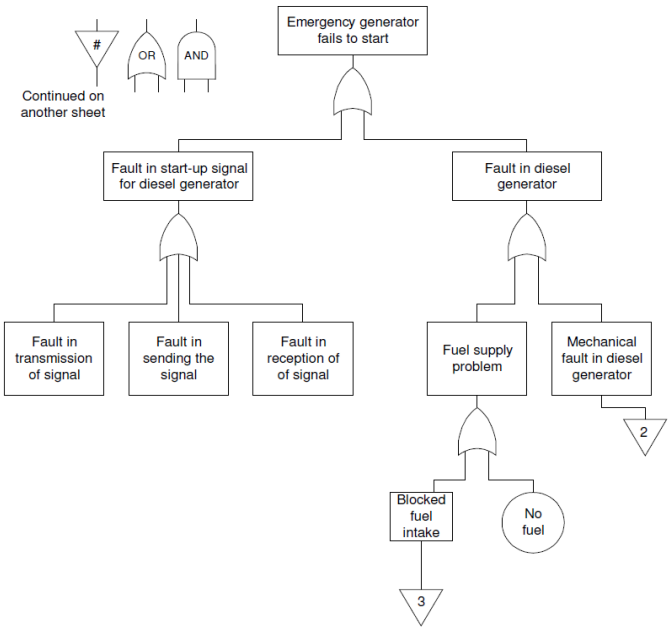



*Figure 4-6 : Arbre des Défaillances appliqué à un générateur de secours (CEA, 2000)*

Les arbres de défaillances sont utilisés dans le domaine du génie civil. Par exemple, dans le domaine des ponts, (Sianipar et *al.*, 1997) a utilisé des arbres de défaillance pour montrer l'influence de la dégradation d'un composant du pont sur ses autres composants et (Johnson, 1999) a utilisé des arbres de défaillance pour déterminer les probabilités de rupture de ces ouvrages.

***Cette méthode des arbres des défaillances apparaît, grâce à son mode de construction et son application en génie civil, bien adaptée à la représentation des mécanismes de dégradation des tunnels maçonnés de la RATP. Néanmoins, elle présente l'inconvénient de ne représenter qu'un seul mode de défaillance par arbre. Dans un contexte de systèmes complexes, où les défaillances sont multiples et parfois redondants, le nombre d'arbres nécessaires pour représenter la globalité des mécanismes de dégradation peut constituer une limite pour son application.***

***La Méthode des Arbres d'Evénements***

La *Méthode des Arbres d'Evénements* (MAE), appelée parfois la *Méthode de l'Arbre des Conséquences*, est issue de l'industrie nucléaire (fig. 4-7). Elle trouve ses applications dans les études de Sûreté de Fonctionnement des systèmes à fonctionnement binaire (marche ou défaillant) et à évolution chronologique (mécanisme non bouclé) (Villemeur, 1988).

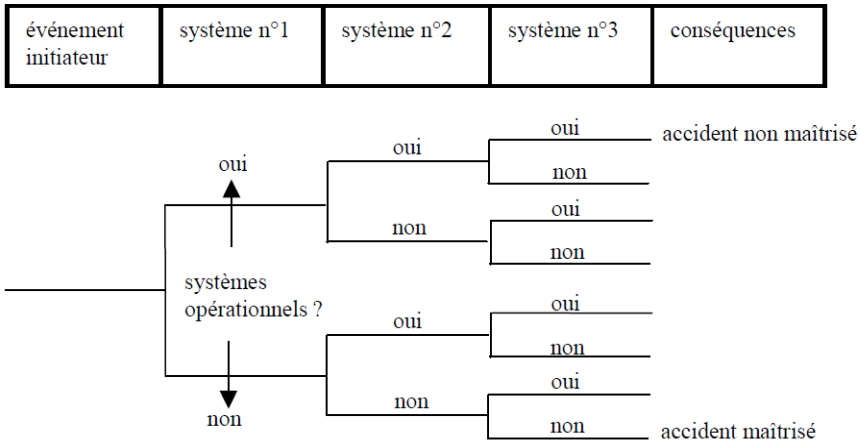



*Figure 4-7 : Structure d'un arbre d'événements (Zwingelstein, 1996)*

***Même si la MAE donne lieu à une représentation claire et de compréhension simple, elle présente des inconvénients pour une utilisation dans le contexte du génie civil. Dans le cas des tunnels maçonnés (et des infrastructures de génie civil en général), les défaillances des ouvrages et de leurs composants sont rarement binaires ou chronologiques, mais plutôt progressives, bouclées et redondantes (Peyras, 2003). Ainsi, leur mise œuvre sur les tunnels maçonnés ne semble pas opportune.***

***La méthode du nœud papillon (Iddir, 2008 ; Baroth et al., 2011)***

L'objectif de la méthode du nœud papillon est de visualiser les scénarios d'accidents qui pourraient survenir, en partant de leurs causes initiales jusqu'aux conséquences sur les cibles identifiées. Cette approche de type arborescente combine un arbre de défaillances et un arbre d'événement (fig. 4-8).

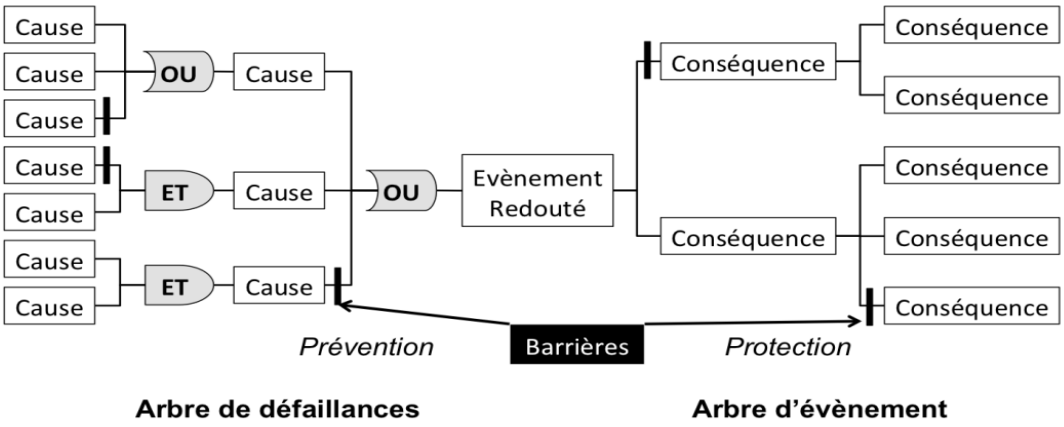



*Figure 4-8 : Représentation de scénarios par le nœud papillon (Talon et al., 2014)*

L'événement redouté est placé au centre du nœud papillon. La partie gauche s'apparente alors à un arbre de défaillances qui représente l'enchaînement des causes de l'événement redouté. La partie droite recherche les conséquences de l'événement redouté grâce à un arbre d'événements. En outre, ce schéma permet la représentation de barrières de sécurité (de prévention, pour réduire la probabilité d'occurrence des causes de défaillance ; ou de protection, pour limiter les conséquences des défaillances).

***Dans un contexte de gestion patrimoniale, cette méthode présente l'avantage de pouvoir représenter, au moyen des barrières, les actions de maintenance préventives ou correctives (barrières de prévention ou de protection respectivement) intégrées dans le sein des mécanismes de dégradation. De cette façon, il est plus intuitif d'évaluer, a priori, l'effet des actions de maintenance.***

***Cette méthode est adaptée pour analyser individuellement chaque mode de défaillance. Néanmoins, la dégradation des tunnels maçonnés est rarement due à un seul mode de défaillance. Pour ce type d'ouvrage, les désordres sont eux-mêmes sources d'autres désordres, pouvant donner lieu à des cercles vicieux qui accélèrent la dégradation des tunnels. Ces interactions entre désordres sont difficilement représentables par la méthode du nœud papillon. Dans ce contexte, une méthode pouvant offrir une vision plus globale de la dégradation des tunnels maçonnés s'avère nécessaire.***

### *4.3.3 Synthèse*

Dans un contexte de gestion de patrimoine, les méthodes qualitatives s'avèrent utiles dans les situations suivantes :

- Lorsque les connaissances sur le système sont imprécises ou intrinsèquement qualitatives ;
- Lorsqu'on peut se satisfaire de résultats approchés (par exemple, caractériser un processus physique sans en donner les paramètres exacts).

C'est fréquemment le cas des gestionnaires de patrimoine qui sont confrontés d'un côté à des incomplétudes, imprécisions (résultats des inspections visuelles), voire indisponibilité des données (historique des ouvrages anciens), et de l'autre à des choix budgétaires (tel est le cas de la gestion à la RATP). Les modèles qualitatifs trouvent donc naturellement leur utilité pour servir de support à des tâches ne requérant pas une forte précision, pour lesquelles les considérations quantitatives sont peu utiles (Travé-Massuyès et *al.*, 1997).

La méthode qualitative des graphes causaux permet de représenter les scénarios de dégradation à partir de séquences de défaillances. Un tel modèle présente de nombreux avantages : il structure la connaissance experte sous forme de scénarios fonctionnels, organise l'information liée au mécanisme autour de trois catégories de variables (fonction, phénomène et symptôme) et permet de prendre en compte les dégradations partielles et progressives des variables et les mécanismes non chronologiques (Peyras, 2003).

Les méthodes quantitatives se présentent a priori comme adaptées pour la représentation des mécanismes de dégradation des tunnels maçonnés de la RATP. Différentes applications dans le domaine du génie civil ont été développées (Sianipar et *al.*, 1997), (Johnson, 1999), (Rhayma, 2013), etc. Même si elles donnent lieu à des représentations claires et de compréhension simple, elles présentent des limites dans le contexte des systèmes complexes :

- La méthode de l'arbre de défaillances et du nœud papillon représentent un seul mode de défaillance par graphe. Dans les mécanismes de dégradation des tunnels maçonnés, les modes de défaillance sont multiples et redondants. Dans ce contexte, ces méthodes s'avèrent limitées pour représenter une vision globale des mécanismes de dégradation.
- La méthode des arbres d'évènements est adaptée dans le cas des systèmes à fonctionnement binaire (marche ou défaillant). Mais dans le contexte du génie civil, les défaillances des ouvrages ou des composants sont rarement binaires ou chronologiques, mais plutôt progressives, bouclées et redondantes et donc son application ne semble pas adaptée.

La méthode qualitative des graphes causaux s'avère comme la plus adaptée pour la représentation des mécanismes de dégradation des systèmes complexes (tels que les infrastructures de la RATP) dans un contexte de gestion patrimoniale où les données disponibles ne se prêtent pas aux approches quantitatives du fait de leur insuffisance, leur incomplétude ou leur nature même (Talon, et *al.*, 2014). En outre, sur la base de l'AMDE, elle permet d'enchaîner de façon inductive les défaillances s'opérant sur les composants des systèmes (Chapitre 1).

## 4.4 *Justification du choix des méthodes*

Les tunnels maçonnés sont des systèmes complexes du fait essentiellement de leurs mécanismes de dégradation. Ces mécanismes sont régis par des processus physiques complexes, redondants, progressifs et faisant intervenir de nombreuses interactions avec le milieu extérieur. Pour modéliser le fonctionnement et les défaillances de ces ouvrages, nous proposons d'utiliser les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement qui sont bien adaptées pour de tels systèmes.

Les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement concernent de plus en plus le domaine du génie civil. Les exemples développés montrent des applications récentes de l'Analyse Fonctionnelle et de l'AMDE aux domaines des digues (Serre, 2005), (Vuillet, 2012), du bâtiment (Talon et *al.*, 2007), des tranchées couvertes en milieu urbain (Paterna, 2009), des dispositifs de protection contre les crues torrentielles (Ghariani, 2014), etc. Nous proposons d'utiliser l'Analyse Fonctionnelle et l'AMDE pour la modélisation des mécanismes de dégradation des tunnels maçonnés de la RATP.

***L'Analyse Fonctionnelle va permettre d'analyser le fonctionnement des tunnels en maçonnerie au sein de leur environnement, et les interactions de leurs composants au sein de la structure. Elle est essentielle avant l'application d'une AMDE. Il existe différentes techniques d'Analyse Fonctionnelle et nous proposons d'utiliser la méthode APTE qui est bien adaptée aux ouvrages de génie civil.***

***La méthode AMDE répond à nos objectifs. Elle permet, d'une part, de recenser de façon exhaustive les modes de défaillance et leurs effets dans les différentes phases de la vie du système (conception, réalisation et exploitation), et, d'autre part, de structurer les informations relatives aux dégradations des tunnels maçonnés. Nous proposons donc d'adapter cette technique aux tunnels maçonnés.***

La méthode des arbres de défaillance est intéressante pour la représentation des mécanismes de dégradation des tunnels en maçonnerie. Sur la base de l'AMDE, elle permet d'enchaîner de façon inductive les défaillances s'opérant sur les composants des tunnels maçonnés.

***Par ailleurs, les modèles qualitatifs semblent pouvoir offrir un excellent support pour la représentation des scénarios de dégradation des tunnels maçonnés. En effet, ils s'adaptent à la complexité du système du tunnel maçonné et aux caractéristiques des informations disponibles. Nous préférons les graphes causaux compte tenu des forts liens de cause à effet existant dans les mécanismes de dégradation des tunnels en maçonnerie.***

Ces méthodes de la Sûreté de Fonctionnement seront appliquées aux tunnels maçonnés de la RATP. Les résultats obtenus seront ensuite exploités comme base pour la construction d'un critère d'évaluation de la performance qui comprend la globalité des aspects techniques qui interviennent dans la gestion patrimoniale de la RATP. Des méthodes multicritère seront utilisées à cet effet selon la démarche proposée par (Serre, 2005), plus concrètement, la méthode d'affectation à base de règles (Azibi, 2003). Cette procédure, résumée par la figure 3-3, sera appliquée dans la section § 7.1.

Dans le Chapitre 5, nous présentons ces outils multicritère qui serviront aussi pour la construction du reste des critères de décision à partir de la formalisation de l'expertise (fig. 3-3). L'application pratique sera réalisée dans la section § 7.2.

# Chapitre 5. Les méthodes multicritère comme outil d'aide à la gestion patrimoniale

Les méthodes d'aide à la décision multicritère représentent le deuxième grand groupe de méthodes scientifiques qui interviennent dans notre démarche (Chapitre 3). L'objectif est double : la construction de critères de décision et le développement d'un outil d'aide à la décision (fig. 5-1).

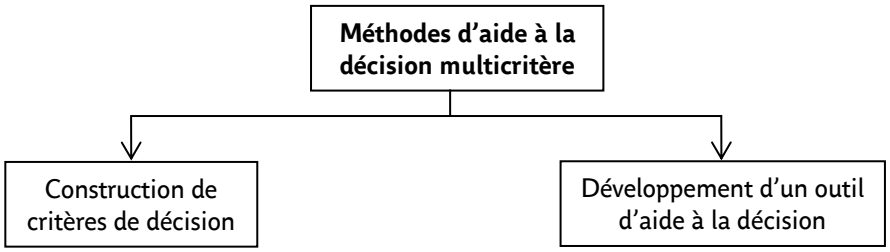



*Figure 5-1 : Les applications des méthodes d'aide à la décision multicritère*

Jusqu'à maintenant, nous avons introduit les outils scientifiques dont nous nous servirons pour traiter l'aspect technique de la gestion du patrimoine. Pour être complet dans le cadre de la gestion patrimoniale, l'aspect technique doit être complété par des éléments d'ordre économique, la qualité du service, l'utilité sociétale du patrimoine, etc. Dans la plupart des cas, les gestionnaires se fondent sur leur expertise pour appréhender ces éléments dans la prise de décision.

Une politique efficace et cohérente requiert une définition et une formalisation claires et précises de tous les paramètres intervenant dans la gestion du patrimoine. Dans ce contexte, la construction de critères permet d'expliciter tous ces paramètres et de mieux comprendre les préoccupations et préférences des gestionnaires.

Pour obtenir une famille cohérente de critères de décision adaptée à notre problématique, nous procédons, dans un premier temps, à la construction d'un critère technique de performance à partir des résultats de la Sûreté de Fonctionnement. Dans un deuxième temps, la construction des critères de gestion patrimoniale est réalisée à partir de la formalisation de l'expertise (étape 2, fig. 3-3). Dans la section 5.3, nous présentons les différents outils scientifiques pour la construction de critères de décision et justifions le choix de la méthode d'affectation à base de règles (Azibi, 2003).

Dans un contexte de gestion patrimoniale, les décisions adoptées seront difficilement optimales vis-à-vis de tous les critères d'analyse. C'est pourquoi il est essentiel de disposer de méthodes d'agrégation multicritère permettant d'identifier le meilleur compromis entre les différents critères afin de trouver des solutions efficaces pour une gestion patrimoniale optimisée. Dans la section 5.4, nous introduisons les différentes méthodes d'aide à la décision multicritère (étape 3, fig. 3-4).

Dans ce chapitre, nous introduisons le problème d'aide à la décision dans la gestion du patrimoine (§ 5.1). Dans un deuxième temps, nous présentons les concepts et les définitions de base de l'aide multicritère à la décision. Nous aborderons les notions d'*aide à la décision*, d'*acteurs*, d'*action*, de *critères* et de *problématiques d'aide à la décision* et définissons le problème multicritère de la gestion du patrimoine de la RATP (§ 5.2). Ensuite, nous présentons les différentes méthodes pour la construction de critères (§ 5.3). Enfin, nous présentons les méthodes d'aide à la décision multicritère (§ 5.4).

## 5.1 *Introduction au problème d'aide à la décision dans la gestion du patrimoine*

Dans le Chapitre 4, nous avons présenté les outils de la Sûreté de Fonctionnement permettant de modéliser le fonctionnement et les mécanismes de dégradation des tunnels maçonnés. Ces résultats pourraient être un point de départ pour définir une première programmation de travaux de maintenance en fonction d'une évaluation des risques et de l'état structurel des ouvrages.

A cause des contraintes financières et des contraintes imposées par les exigences de l'exploitation, la capacité de mise en œuvre des interventions de maintenance est limitée. Dans ce contexte, une gestion du patrimoine basée uniquement sur des critères techniques ne s'avère pas suffisante pour trouver des solutions optimisées.

***Notre objectif consiste à fournir aux gestionnaires de la RATP une méthodologie permettant de considérer le cycle de vie des ouvrages, la qualité du fonctionnement global du réseau de transports et les ressources technico-économiques disponibles pour optimiser la gestion du patrimoine.*** Mais comment intégrer tous ces aspects, de natures si différentes, dans une procédure de décision quand ils se présentent, a priori, « incomparables » ?

Les outils multicritère nous permettent de formaliser tous ces points de vue sous la forme de *critères* et de les intégrer dans un outil d'aide à la décision. Pour ce faire, les questions scientifiques rattachées à notre recherche sont les étapes classiques du traitement d'un problème d'aide à la décision (Roy et Bouyssou, 1993) que nous examinerons dans le contexte de la gestion du patrimoine d'infrastructures de la RATP :

- Comment définir l'ensemble des actions qui seront les objets de la décision ?
- Comment déterminer une famille cohérente de critères adaptée à notre problème de gestion d'un patrimoine d'infrastructures de transport en service, soumise à des contraintes techniques et financières de plus en plus sévères ?
- Quelles sont les problématiques d'aide à la décision et quelles méthodes multicritère doit-on utiliser dans notre recherche ?

Avant de présenter les méthodes scientifiques susceptibles de répondre à ces questions, nous introduisons les concepts de base qui aideront le lecteur à se familiariser avec les méthodes multicritère.

## 5.2 *Les concepts théoriques des méthodes multicritère*

### *5.2.1 Définition de l'aide à la décision*

L'aide à la décision est « l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponses aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision, éléments concourant à éclairer la décision et normalement à recommander, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution d'un processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels cet intervenant se trouve placé d'autre part » (Roy et Bouyssou, 1993). Son objectif est d'ordonner et trier différentes informations pour permettre une meilleure prise de décision. Autrement dit, elle peut être définie comme « une formalisation du bon sens pour les problèmes où il est trop difficile d'utiliser le bon sens de manière informelle » (Keeney, 1982).

Tout problème de décision peut être caractérisé par un certain nombre d'éléments qui permettent de le modéliser. Il s'agit en effet d'identifier les *acteurs* concernés par cette prise de décision, de déterminer ce sur quoi porte la décision (*actions*), d'identifier la *problématique* posée par le problème de décision ainsi que de mettre en relief les points de vue sur lesquels les actions vont être jugées afin de prendre la décision *(critères)*.

### 5.2.2 Acteurs

La formulation du problème de décision est conditionnée et définie par les divers intervenants dans le processus décisionnel : un ou plusieurs *décideurs* qui expriment leurs attentes et précisent leurs objectifs, les *experts* censés éclairer certains aspects importants pour la prise de décision, *l'homme d'étude* organisant le débat pour la modélisation du problème (Azibi, 2003).

Généralement, les décideurs qui interviennent dans un problème de décision n'ont pas tous le même pouvoir décisionnel et leurs points de vue peuvent différer voire s'opposer. ***Dans notre recherche, la figure du décideur se limite uniquement aux gestionnaires de la RATP chargés de définir les programmes de maintenance***. Cette circonstance simplifie notamment la formulation du problème de décision et évite les questions liées à la pluralité des décideurs en cas de désaccord avec les choix retenus.

### 5.2.3 Actions

Le terme d'action « *a* », dans le contexte d'aide à la décision, est utilisé pour désigner ce qui constitue l'objet de la décision ou de sur quoi porte l'aide à la décision. Selon le contexte, une action *a* sera une décision, une solution, une option, une variante… (Roy, 1985). On notera « *A* » l'ensemble de ces actions.
Dans notre recherche, **l'action *a* représente l'ouvrage de génie civil concerné par une Proposition de Gros Entretien (PGE)** pour lequel on doit prendre la décision de s'il doit ou non faire partie de la programmation des travaux de réhabilitation. **L'ensemble *A* correspond donc à tous les ouvrages concernés par une PGE**.

La définition de l'ensemble des actions *A* est une étape très importante dans un processus d'aide à la décision. On note que, dans la plupart des cas, il ne s'impose pas comme une réalité objective facile à cerner. Cet ensemble peut être de plusieurs natures (Roy, 1985) :

- *En extension* ou *en compréhension* : *en extension* lorsque l'on peut dénombrer et énumérer toutes les actions possibles et *en compréhension* lorsqu'il est fini ou infini, mais trop grand pour que l'énumération soit possible ;
- *Stable* ou *évolutif* : *stable* lorsqu'il n'est pas susceptible d'être modifié en cours de procédure du fait de la procédure elle-même (*A* serait alors révisable), ou d'un contexte extérieur à celle-ci (*A* serait alors transitoire) ; *évolutif* dans le cas inverse, c'est-à-dire que *A* est révisable, transitoire, ou les deux ;
- *Global* ou *fragmenté* : *globalisé* si toutes les actions sont exclusives les unes des autres et *fragmenté* si les résultats du processus de décision font intervenir des combinaisons de plusieurs éléments de *A*.

Il est à noter que notre ensemble *A* est défini en extension, stable et fragmenté.

- En *extension* : même si les ouvrages composant le patrimoine d'infrastructures de la RATP sont nombreux, il est possible de les énumérer ;
- *Stable* : le nombre d'ouvrages concernés n'est pas modifié pendant l'analyse ;
- *Fragmenté* : la définition des programmes de travaux concerne plusieurs actions ouvrages. Dans ce cas, l'exécution d'une action n'implique pas de rejeter tous les autres.

### 5.2.4 Critères

Une fois les actions du problème définies, il faut pouvoir les comparer afin d'apporter des éléments de réponse au problème de décision. Cette comparaison se fonde sur les points de vue jugés importants par les acteurs et sont modélisés sous la forme de *critères* selon des échelles d'appréciation intelligibles et reconnues par tous.

Dans le contexte de l'aide à la décision, un *critère* est une fonction *g* définie sur l'ensemble d'actions *A,* qui prend ses valeurs dans un ensemble totalement ordonné et qui représente les préférences du décideur selon un point de vue (Vincke, 1989). Dans un langage mathématique, l'évaluation d'une action *a* selon un critère *j* est notée $g_j(a)$.

Ces évaluations dépendent de la précision des données disponibles. Elles peuvent être considérées comme parfaites, comporter des incertitudes (comme c'est le cas des évaluations des désordres basées sur les inspections visuelles) ou être liées à de mauvaises connaissances (comme par exemple, l'historique des ouvrages anciens dont certaines informations sont difficilement récupérables). Trois types de critères sont distingués en fonction de la qualité de l'évaluation qu'ils permettent :

- Le *vrai critère* : qui permet une évaluation considérée comme parfaite, sans incertitude ; le décideur est toujours capable de comparer toutes les actions entre elles à l'aide de ce critère (le décideur préfère l'action *a* à l'action *b*);
- Le *quasi critère* : qui permet une évaluation dans laquelle des incertitudes persistent ; le décideur a donc la possibilité de ne pas se prononcer sur la comparaison d'actions à l'aide de ce critère (l'action *a* est préférée à *b*, ou l'action *a* est indifférente à *b*) ;
- Le *pseudo-critère* : qui permet une évaluation liée à des impressions ou des mauvaises connaissances (l'action *a* est préférée à *b*, l'action *a* est faiblement préférée à *b*, ou l'action *a* est indifférente à *b*) ; le décideur introduit alors deux seuils pour comparer des actions à l'aide de ce critère : le *seuil d'indifférence* et le *seuil de préférence*.

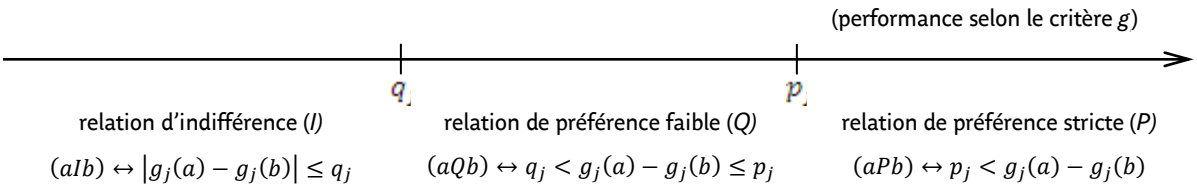
Dans notre problématique, la qualité de l'information disponible est assez hétérogène (cf. § 1.2). Parfois cette information présente une certaine variabilité ou imprécision, comme c'est le cas des résultats des inspections visuelles (note MARION), ou, tout simplement, elle est fondée sur des aspects qualitatifs. Dans ces circonstances, la notion de *pseudo-critère* s'avère utile pour formaliser et structurer ce type d'information. Nous considérons opportun de développer plus en détail ce type de critère.

***Pseudo-critère***

Quand les critères sont construits à partir d'informations imprécises, ou présentant une certaine variabilité, il est parfois abusif de considérer que toute différence de performance, aussi faible soit-elle, est révélatrice d'une situation de préférence stricte (Azibi, 2003). Par exemple, pour un critère de coût, une différence très faible entre deux actions peut ne pas être considérée comme une préférence établie envers la moins coûteuse.

Dans ces cas, le concept de pseudo-critère introduit le *seuil d'indifférence* « $q_j$ » et le *seuil de préférence* « $p_j$ ». Le seuil d'indifférence $q_j$ correspond à l'écart maximal de performance entre deux actions compatibles avec une situation d'indifférence (les deux actions seraient équivalentes pour le décideur). Le seuil de préférence $p_j$ correspond à l'écart de performance entre deux actions à partir duquel le décideur préfère strictement l'action présentant la meilleure performance.

La comparaison d'actions selon un pseudo-critère donne lieu à trois types de relations possibles (fig. 5-2) :




Où :

- $g_j(x)$: performance de l'action *x* selon le critère *j*. (Il faut remarquer que les expressions précédentes supposent que $g_j$ est un critère à maximiser) ;
- $q_j$ : seuil d'indifférence pour le critère *j* ;
- $p_j$ : seuil de préférence pour le critère *j*.

*Figure 5-2 : Pseudo-critère. Types de relations possibles : indifférence, préférence faible, préférence stricte*

Ces situations de préférences dans la comparaison de deux actions sont détaillées dans le tableau 5-1 :

| Situation | Définition |
|---|---|
| Indifférence *(I)* | Elle correspond à l'existence de rasions claires et positives qui justifient une équivalence entre les deux actions |
| Préférence faible *(Q)* | Elle correspond à l'existence de raisons claires et positives qui infirment une préférence stricte en faveur de l'une (identifiée) des deux actions mais ces raisons sont insuffisantes pour en déduire soit une préférence stricte en faveur de l'autre, soit une indifférence entre ces deux actions (ces raisons ne permettent donc pas d'isoler l'une des deux situations précédentes comme étant la seule appropriée). |
| Préférence stricte *(P)* | Elle correspond à l'existence de raisons claires et positives qui justifient une préférence significative en faveur de l'une (identifiée) des deux actions. |

*Tableau 5-1 : Relations de préférence entre actions engendrées par le pseudo-critère (Roy et Bouyssou, 1993)*

***Famille de critères***

Afin de regrouper tous les aspects jugés pertinents par les acteurs en vue de la prise de décision, plusieurs critères sont nécessaires. Cet ensemble de critères, nommé *famille de critères*, est représenté par $F = \{g_1, g_2, \ldots, g_m\}$.

Pour (Bouyssou, 1990), deux qualités sont nécessaires pour une famille de critères : être lisible, contenir un nombre suffisamment restreint de critères pour qu'il soit possible de raisonner sur cette base ; et être opérationnelle, c'est-à-dire être acceptée comme base de travail pour la suite de l'étude. (Roy et Bouyssou, 1993) proposent en plus de ces qualités trois autres axiomes pour que la famille de critères soit considérée comme *cohérente* :

- *Exhaustivité* : la famille de critères doit représenter tous les aspects nécessaires pour comparer les actions ;
- *Cohésion* : les préférences modélisées sur chacun des critères doivent être cohérentes avec les préférences globales exprimées sur les actions ;
- *Non redondance* : les critères superflus, dont la suppression ne remettrait pas en cause les deux axiomes précédents, ne sont pas retenus.

La définition d'une famille de critères *F* est certainement la partie la plus délicate de la formulation d'un problème de décision (Vincke, 1989) et, outre la cohérence de cette famille, l'*indépendance* entre critères est également exigée (Roy et Bouyssou, 1993). Selon (Roy, 2009), dire qu'il existe des dépendances entre certains critères d'une famille *F* supposée comme cohérente signifie que l'on peut « mettre en évidence au moins deux sous-familles de *F* (éventuellement réduites à un seul critère) entre lesquelles il existe des liens (de nature quelconque) tels que ne pas tenir compte de ces liens pour asseoir la validité, la crédibilité ou l'intensité d'une relation de préférence globale peut conduire à négliger, involontairement et à tort, certains aspects de la réalité qui méritent d'être pris en compte pour l'aide à la décision ».

Une trop grande dépendance de certains critères peut fausser les résultats de la démarche d'aide à la décision et rendre nécessaire une reformulation de la famille de critères. Bien qu'il soit toujours difficile de construire une famille de critères parfaitement indépendante, il convient de minimiser tous les cas de dépendance. La dépendance, étant une notion complexe, nous renvoyons le lecteur intéressé vers (Roy, 2009).

### 5.2.5 Problématiques d'aide à la décision

Pour (Roy et Bouyssou, 1993), quatre problématiques de référence peuvent être considérées : le *choix*, l'*affectation*, le *rangement* et la *description*.

- La problématique du *choix* (P.α) consiste à déterminer, au sein de *A*, un sous-ensemble aussi restreint que possible contenant des « meilleures » actions (optimums) ou, à défaut, des actions « satisfaisantes » (satisfectum). La problématique classique de l'optimisation s'insère dans ce cadre.
- La problématique de l'*affectation* (P.β) consiste à affecter chaque action de *A* dans une catégorie prédéfinie. Ces catégories peuvent être ordonnées ou non. Nous retiendrons le terme *tri* lorsqu'elles le sont et le terme *classification* dans le cas contraire.
- La problématique du *rangement* (P.γ) consiste à classer les actions par ordre de préférence décroissant conformément aux préférences.
- La problématique de *description* (P.δ) consiste à définir, dans un langage approprié à l'aide à la décision, la description des actions de l'ensemble *A* et de leurs conséquences. Cette problématique représente la phase de modélisation du problème de décision.

Notons qu'un même problème d'aide à la décision peut parfois être divisé en plusieurs problématiques (Roy, 1985). Il est donc essentiel d'identifier quelle problématique concerne chaque étape de l'aide à la décision. La problématique de description est souvent une étape préalable où la construction de la famille de critères est réalisée (sections 7.1 et 7.2). Dans notre cas, plusieurs critères sont construits à partir de l'agrégation d'aspects qualitatifs, ce qui suppose un problème d'affectation (Azibi, 2003), (Serre, 2005), (Labbouz, 2008), (Vuillet, 2012). Une fois que la famille de critères est construite, nous définirons dans le Chapitre 8 les différentes problématiques auxquelles nous serons confrontés lors le développement d'un outil d'aide à la gestion du patrimoine de la RATP.

### 5.2.6 La gestion du patrimoine de la RATP comme un problème de décision multicritère

Afin de développer un outil d'aide à la gestion adapté au contexte du patrimoine de la RATP, il est nécessaire d'assurer la clarté de la correspondance entre le problème réel et la modélisation que nous visons à réaliser à partir des méthodes multicritère d'aide à la décision. En outre, la transparence de cette modélisation est essentielle pour faciliter l'appropriation de cet outil et la compréhension de son fonctionnement.

L'objectif de la gestion patrimoniale est d'assurer la sécurité, la capacité de service et la pérennité des infrastructures de transport de la RATP. Les ressources technico-économiques consacrés à cet effet sont, par nature, limités. Dans ce contexte, ***l'objectif de notre outil est d'aider aux gestionnaires de la RATP à définir une programmation optimisée des travaux de maintenance, prenant en compte le cycle de vie des ouvrages, la qualité du fonctionnement globale du réseau de transports et les ressources technico-économiques.*** Ce problème de décision peut se synthétiser dans les questions suivantes : *qu'est-ce qu'il faut faire* et *quand* ?

Dans ce contexte, nous explicitons comment le problème de la gestion du patrimoine de la RATP se traduit en un problème de décision multicritère. (La construction complète de ce problème sera développée dans la Partie III).

***Acteurs***
Les ***gestionnaires de la RATP*** sont chargés de définir les programmes de maintenance. Il est donc primordial que notre outil s'adapte à leurs attentes et besoins.

***Actions***
La configuration des programmes de maintenance est réalisée par les gestionnaires de la RATP à partir des Propositions de Gros Entretien (PGE) issues des actions de surveillance (§ 1.2.5). Dans ce cas, l'action (ou objet de la décision) est ***l'ouvrage de génie civil concerné par un PGE*** pour lequel il faut décider s'il doit être réhabilité ou non. L'ensemble d'actions *A* est formé donc par tous les ouvrages du réseau RATP concernés par une PGE.

***Critères***
La famille de critères doit permettre la comparaison des actions sous la globalité d'aspects qui interviennent dans le processus décisionnel. Par conséquent, les critères de décision considérés sont (Chapitre 7) :

- La « ***performance*** », qui correspond aux aspects techniques. Ce critère permet la comparaison d'actions en fonction de l'état structurel, l'historique de travaux de réhabilitation et l'évaluation des risques associés à l'environnement de l'ouvrage.
- L' « ***impact de la défaillance*** ». Ce critère vise à mesurer l'impact occasionné par une éventuelle défaillance. Les actions sont comparées en fonction de l'importance stratégique des ouvrages au sein du réseau de transports, et d'autres aspects externes, comme l'image de la RATP par exemple.
- L' « ***opportunité de travaux*** ». La coordination des travaux de maintenance avec d'autres chantiers peut produire des économies et une diminution des impacts (Duarte, 2012). Ce critère vise à prendre en compte les opportunités de travaux qui peuvent se produire en fonction des interactions entre la programmation des travaux de maintenance et ceux de différentes natures.
- Le « ***groupement de travaux*** ». Ce critère vise à prioriser les actions qui sont en proximité géographique. La concentration de travaux de la même nature permettrait de réaliser des économies d'échelle et de faciliter la logistique des chantiers.

En ce qui concerne les ressources technico-économiques, nous préférons ne pas les faire intervenir dans le cadre de la décision multicritère. En effet, ces aspects interviennent dans la gestion patrimoniale pour définir les limites des programmations, mais ils n'ont aucune influence dans le raisonnement des gestionnaires de la RATP au moment de *choisir* ni de *prioriser* les ouvrages à traiter. Le traitement des ressources technico-économiques disponibles sera détaillé dans la section 8.3.

Dans la section 5.3, nous présentons les différentes méthodes pour la construction de critères de décision et justifions le choix de la méthode que nous retenons pour construire notre famille cohérente de critères de décision. L'application pratique sera développée dans le Chapitre 7.

***Problématiques d'aide à la décision***

La définition des programmations de travaux de maintenance pourrait se synthétiser dans deux étapes fondamentales : sélectionner les ouvrages à traiter et établir un ordre d'intervention permettant d'obtenir le maximum de bénéfice à partir des ressources disponibles. Dans ce contexte, nous proposons de définir deux problématiques d'aide à décision :

- ***Problématique de tri***. Dans un premier temps, nous visons à classer les actions dans des catégories de priorité, en cohérence avec celles proposées par la notation MARION (§ 1.2.3). De cette façon, les gestionnaires de la RATP peuvent obtenir une distribution des travaux à réaliser à court, moyen et long terme.
- ***Problématique de rangement***. Dans un deuxième temps, nous proposons d'établir, en fonction des résultats précédents, une hiérarchisation des ouvrages selon un ordre décroissant de priorité.

Différentes méthodes multicritère d'aide à la décision existent pour aborder ces problématiques. Nous les présentons dans la section 5.4, ainsi qu'une démarche permettant de choisir les méthodes les plus adaptées à notre contexte. L'application pratique sera développée dans le Chapitre 8.

Enfin, nous synthétisons dans le tableau 5-2 le problème de décision multicritère qui modélise la gestion patrimoniale de la RATP :

| **Problème de décision multicritère** | **Contexte de la gestion patrimoniale de la RATP** |
|---|---|
| *Problème d'aide à la décision* | Définir une programmation optimisée des travaux de maintenance prenant en compte le cycle de vie des ouvrages, la qualité du fonctionnement global du réseau de transports et les ressources technico-économiques disponibles. |
| *Acteurs* | Gestionnaires de la RATP |
| *Action* | Ouvrage de génie civil concerné par une Proposition de Gros Entretien (PGE) |
| *Ensemble d'actions* | Tous les ouvrages concernés par une PGE |
| *Critères* | Les différents points de vue considérés par les gestionnaires de la RATP dans le processus décisionnel :<br>▪ « ***performance*** » ;<br>▪ « ***impact de la défaillance*** » ;<br>▪ « ***opportunité de travaux*** » ;<br>▪ « ***groupement de travaux*** ». |
| *Problématiques d'aide à la décision* | ▪ ***Problématique de tri.*** Les actions sont classées dans des catégories de priorité : court terme (entre 1 et 4 ans), moyen terme (entre 4 et 8 ans), et long terme<br>▪ ***Problématique de rangement.*** Les actions sont hiérarchisées selon un ordre décroissant de priorité. |

*Tableau 5-2 : Concepts et méthodes multicritère adaptés au contexte de la gestion patrimoniale de la RATP*

## 5.3 *Les méthodes pour la construction de critères modélisant les préférences des décideurs*

La gestion patrimoniale tient compte de multiples données de différente nature : l'évaluation de l'état structurel des ouvrages, les coûts des travaux de maintenance, l'impact des défaillances d'un point de vue stratégique, politique, économique, social, culturel… Considérer tous ces aspects, un par un, pour comparer toutes les actions dans un processus décisionnel ne s'avère pas comme une méthode adaptée dans le contexte de la gestion patrimoniale de la RATP (dont le réseau est composé par près de 9 000 ouvrages).

Ces aspects ou éléments primaires de la décision sont représentés par le terme « *conséquences* » dans le contexte de l'aide à la décision multicritère (Roy et Bouyssou, 1993) et se définit comme « tout effet ou tout attribut de l'action *a* susceptible d'interférer avec les objectifs ou avec le système de valeurs d'un acteur du processus de décision en tant qu'élément primaire à partir duquel il élabore, justifie ou transforme ses préférences ».

Quand le nombre de conséquences à prendre en compte dans un problème de décision est élevé, il est possible d'agréger en un seul critère celles qui sont proches (Azibi, 2003). De cette façon, la méthodologie d'aide à la décision gagne en lisibilité et en compréhension.

Il faut bien distinguer l'*agrégation des conséquences en un critère* de la *construction d'un critère de synthèse* :

- *L'agrégation en un critère* consiste à agréger les conséquences de nature suffisamment voisines ou complémentaires sur un même aspect de la décision. Le résultat est un seul critère modélisant un seul point de vue du décideur.
- *La construction d'un critère de synthèse* est réalisée à partir de conséquences ne concernant pas le même aspect de la décision. De cette façon, la construction d'un critère de synthèse est davantage centrée sur la conciliation et l'arbitrage entre des aspects différents qui peuvent être conflictuels entre eux.

Pour bien les différencier, nous recourrons à l'exemple classique du choix de voiture présenté par (Azibi, 2003). L'aspect « *confort* » peut regrouper plusieurs aspects bien différents : le volume du coffre, la visibilité, la qualité des sièges, l'existence d'espaces de rangement, l'espace existant pour les places arrières, la qualité de la suspension, le niveau de bruit, etc. Vouloir agréger tous ces aspects peut être souhaitable pour n'avoir à comparer les voitures que sur un critère « *confort* » global et ainsi ne pas avoir, pour choisir sa voiture, à considérer ces différents éléments séparément. Ces aspects sont différents et présentent même des échelles différentes (le volume du coffre est mesuré en $dm^3$ et la visibilité se mesure plus qualitativement (excellente, assez bonne, dangereuse, etc.)), mais ils font partie d'un même point de vue pour le décideur. Dans ce cas, nous sommes confrontés à un problème d'agrégation du critère « *confort* ».

Par ailleurs, si on veut comparer les différentes voitures à partir du degré de satisfaction du client, il faudrait arbitrer entre des conséquences qui ne représentent pas le même aspect de la décision et qui peuvent être conflictuels, comme le prix (qui représente un critère à part entière) et le niveau de bruit (qui est une des composantes du confort). Cette situation correspondrait à un problème de construction d'un critère de synthèse « *degré de satisfaction du client* ».

***Pour construire notre famille de critères, nous sommes confrontés à un problème d'agrégation. Notre objectif est d'agréger les conséquences de nature suffisamment voisines, ou complémentaires sur un même aspect de la décision, en un seul critère de décision. De cette façon, nous obtiendrons une famille de critères où chaque critère représente chacun des points de vue qui interviennent dans le processus décisionnel de la gestion patrimoniale de la RATP (fig. 5-3).***

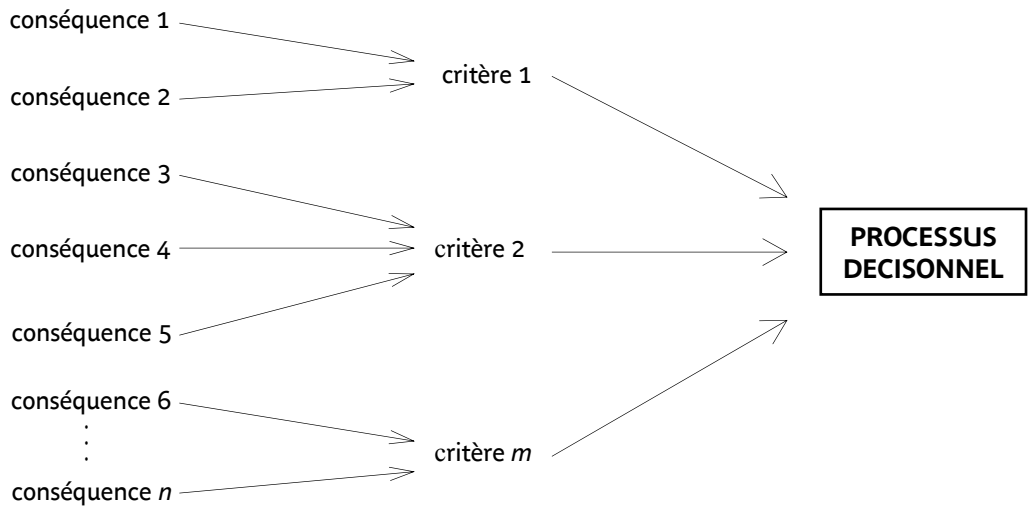



*Figure 5-3 : Construction des critères de décision par agrégation de conséquences*

### *5.3.1 Mécanismes d'agrégation*

La construction de critères nécessite une démarche transparente et intelligible pour les différents acteurs. Selon (Bouyssou, 1990) « a priori, on peut utiliser pour bâtir un tel critère (agrégeant plusieurs conséquences), toute méthode multicritère conduisant à l'établissement d'un critère unique de synthèse. Cependant, compte tenu de la proximité des diverses conséquences et de l'exigence de transparence du modèle, on retient généralement pour ce faire des méthodes relativement simples : technique lexicographique, somme pondérée, somme des rangs, etc. ou une combinaison ad hoc de ces méthodes ». Cependant, les exigences de transparence et la complexité de la problématique peuvent exiger des mécanismes d'agrégation plus sophistiqués qui doivent être construits en interaction avec le décideur. Dans ce contexte, deux familles de mécanismes d'agrégation peuvent être distinguées : les *mécanismes d'agrégation analytiques* et *les mécanismes d'agrégation par règles* (Azibi, 2003).

***Mécanismes d'agrégation analytiques***

Ce type de mécanisme est basé sur une fonction mathématique d'agrégation définie par une expression analytique. L'avantage principal est sa compacité et la simplicité de représentation qui en résulte, ce qui fait que le recours à ce type de mécanisme soit très courant. En outre, les mécanismes d'agrégation analytiques sont fréquemment utilisés dans une logique compensatoire. Comme par exemple, la somme pondérée, qui offre l'avantage d'une grande simplicité.

Néanmoins, les opérateurs analytiques classiques d'agrégation s'avèrent souvent inadaptés (non *signifiants* au sens de la théorie du mesurage de (Roberts, 1979)) lorsqu'il s'agit d'agréger des conséquences qualitatives qui n'ont qu'une signification ordinale. En outre, des opérateurs ordinaux *signifiants* typiques comme *min* ou *médiane* présentent les inconvénients de

n'exploiter qu'une faible partie de l'information disponible et de traduire une logique d'agrégation souvent trop simple et uniforme.

D'autres opérateurs plus sophistiqués existent (Azibi, 2003), (Grabisch, 1996), mais lorsque la logique d'agrégation que l'on désire modéliser est relativement élaborée, la construction d'un mécanisme analytique peut s'avérer extrêmement complexe et la démarche à suivre n'est pas toujours évidente. En outre, quand le nombre de paramètres à estimer est élevé et, surtout, leur interprétation n'est pas évidente, il peut constituer un inconvénient majeur dans un contexte d'aide à la décision (effet « usine à gaz », tant redouté par les décideurs). Tous ces écueils limitent la capacité « effective » de représentation des mécanismes analytiques, même si la capacité « potentielle » est formellement assurée pour un modèle cohérent.

Les mécanismes d'agrégation analytique ne peuvent être utilisés que lorsque les évaluations à agréger s'expriment sur des échelles numériques (les évaluations correspondent à des nombres). Ces échelles sont alors soit quantitatives, soit qualitatives associées à des valeurs numériques (qualitatives ordinales), comme c'est le cas de l'échelle MARION (§ 7.1).

***Mécanismes d'agrégation par règles***

Le mécanisme d'agrégation par règles s'avère très utile pour agréger des conséquences qualitatives (Azibi, 2003). Il consiste en une base de règles de type « ***si***… ***alors***… » dont la partie condition (***si***) concerne les évaluations de l'action sur un ensemble d'attributs ou conséquences, et la partie conclusion (***alors***) indique l'affectation à une catégorie de l'échelle d'évaluation globale.

Soulignons que l'utilisation d'un mécanisme d'agrégation par règles s'avère mieux adaptée à l'agrégation de conséquences hétérogènes (différentes natures et/ou échelles d'évaluations) qu'une agrégation analytique. Dans le cas d'agrégation de conséquences qualitatives, il n'est pas nécessaire d'avoir des évaluations numériques pour construire le mécanisme et procéder à l'agrégation, ce qui simplifie l'agrégation et améliore sa compréhension.

La formulation des règles permet d'exprimer les principes d'agrégation dans un langage très proche du naturel, permettant de construire aisément et de façon très ouverte une agrégation correspondant aux préférences du décideur. Cet aspect facilite l'interaction avec le décideur, en lui permettant de « s'approprier » la méthode d'agrégation dès l'origine, et de formaliser son expertise de façon simple et transparente. On a donc recours à ce genre de mécanismes pour représenter des logiques d'agrégation complexes ou multiples difficilement modélisables par des opérateurs analytiques classiques.

Ces mécanismes d'agrégation permettent, ainsi, des démarches de modélisation plus fines et présentent un pouvoir d'expression effective supérieur à celui d'un mécanisme analytique. Remarquons qu'un tel modèle possède un pouvoir explicatif bien supérieur à un modèle analytique (possibilité d'exhiber les règles à l'origine de l'agrégation), ce qui constitue un atout certain en aide à la décision permettant d'éviter les effets « boîte noire ». De cette façon on obtient des modèles transparents et facilement interprétables par les décideurs, même s'ils ne sont pas trop familiarisés avec les méthodes multicritère d'aide à la décision (Serre, 2005).

Néanmoins, l'élaboration de ces règles, en concertation avec le décideur et/ou à partir d'exemples, est parfois laborieuse et la vérification des propriétés de cohérence peut s'avérer complexe.

### 5.3.2 Synthèse et justification du choix des méthodes pour la construction de critères

Nous avons présenté les méthodes pour la construction des critères : les méthodes d'agrégation analytiques et les méthodes d'agrégation par règles.

Les méthodes d'agrégation analytiques se basent sur des fonctions mathématiques simples du genre somme pondérée, min, max, médiane, etc. Les avantages principaux de ces méthodes sont la simplicité de représentation qui en résulte et la possibilité de les utiliser dans une logique compensatoire. Néanmoins, ces méthodes présentent l'inconvénient de n'exploiter qu'une faible partie de l'information. En outre, lorsque la logique d'agrégation que l'on désire modéliser est un peu élaborée, la construction d'un mécanisme analytique peut s'avérer extrêmement complexe, comme par exemple, dans le cas où le nombre de conséquences est élevé.

Dans ce contexte, les méthodes d'agrégation par règles s'avèrent plus adaptées. Les règles du type « ***si***… ***alors***… » permettent une formulation plus souple et proche du raisonnement des acteurs. De cette façon on obtient de modèles transparents et facilement interprétables par les décideurs.

***Dans le cas de la gestion patrimoniale, les conséquences à considérer sont nombreuses et, dans la plupart de cas, de différentes natures (qualitative et quantitative). Dans ce contexte, nous considérons les méthodes d'agrégation par règles comme les plus adaptées à notre problématique. En outre, leur transparence permet aux décideurs de « s'approprier » la méthode d'agrégation dès l'origine et évite les effets de « boîte noire », ce qui constitue un atout dans le cadre de l'aide à la décision.***

L'application de ces méthodes nous permettra de construire une famille de critères de décision qui formalise la globalité des points de vue intervenants dans la gestion patrimoniale de la RATP (Chapitre 7). Chaque critère représente un axe de décision de différente nature et, dans la plupart des cas, les critères peuvent être conflictuels au moment d'évaluer les différentes actions. Dans ces circonstances, il est nécessaire de disposer des méthodes d'aide à la décision multicritère qui permettent d'identifier des solutions de compromis.

## 5.4 *Les méthodes d'aide à la décision multicritère*

Différentes méthodes d'aide à la décision multicritère sont susceptibles d'être appliquées dans l'élaboration de notre outil d'aide à la gestion du patrimoine RATP. Dans cette section, nous présentons les principes de ces méthodes. Une description plus détaillée avec des exemples d'application dans le domaine du génie civil est disponible en Annexe 2.

(Vincke, 1989) propose un classement des méthodes de l'aide à la décision multicritère en trois catégories : *l'approche du critère unique de synthèse*, *l'approche du surclassement de synthèse* et *les méthodes itératives*.

### 5.4.1 L'approche du critère unique de synthèse.

Cette catégorie est appelée également ***la théorie de l'utilité multi-attribut*** (Vincke, 1989), ou méthodes d'agrégations complètes (Scharling, 1985). Ces méthodes permettent d'évacuer toute incomparabilité (Roy, 1985) et procèdent par agrégation puis comparaison. Elles sont exploitées dans le cas où le décideur est capable de juger toute paire d'actions (*a, b*) et ce selon un des cas suivant : soit *a* est préférée à *b*, soit *b* est préférée à *a*, soit le décideur est indifférent entre *a* et *b*. Il n'y a donc pas d'incomparabilité entre deux actions.
Les évaluations sur les différents critères de chaque action sont agrégées en une note de synthèse unique. Ensuite, la comparaison des actions est réalisée sur cette seule note de

synthèse. Nous remarquons que la perspective d'obtenir une note unique de synthèse pourrait être utile pour obtenir, par exemple, un indicateur représentant l'intérêt à réhabiliter un ouvrage. Mais pour l'application de ces méthodes, il est nécessaire de procéder à une normation qui ramène les évaluations de chaque critère à une échelle commune, comme par exemple, un rapport coût/bénéfice. Dans un contexte de gestion patrimoniale, où les critères à considérer sont de différentes natures : techniques, économiques, sociales, etc., cette normation complexifierait la démarche d'analyse multicritère. Dans ce cas, l'approche du critère unique de synthèse apparait comme mal adaptée à notre problématique.

### *5.4.2 L'approche du surclassement de synthèse.*

Cette catégorie de méthodes accepte l'incomparabilité entre actions. Elles sont appelées également ***méthodes de surclassement*** (Vincke, 1989), ou ***méthodes d'agrégations partielles*** (Scharling, 1985) et se caractérisent par l'établissement de structures de préférence forte, faible et d'indifférence (Roy, 1985).

Ces méthodes procèdent par comparaison puis agrégation. Dans un premier temps, les actions sont comparées deux à deux sur chaque critère avant d'agréger les résultats des différences obtenues dans un deuxième temps. En fonction de ces résultats, on interprète les coalitions de critères en faveur d'une alternative ou d'une autre. Ces méthodes présentent l'avantage de permettre la comparaison des actions sur des critères mesurés selon des échelles de valeurs différentes. On peut ainsi répondre à un problème de décision considérant des critères qualitatifs et quantitatifs (Roy et Bouyssou, 1993), ce qui représente un avantage par rapport à l'approche du critère unique de synthèse. Toutefois, on remarque que la formulation complexe de ces méthodes peut produire un effet « *boîte noire* » susceptible d'ajouter de la complexité au problème d'aide à la décision, qui plus est pour un utilisateur non spécialiste de l'aide à la décision.

### *5.4.3 Les méthodes interactives (Vincke, 1989)*

Ces méthodes sont également appelées ***méthodes d'approche du jugement local interactif avec itération essai erreur***, ou ***méthodes d'agrégation locales*** (Scharling, 1985). Elles sont fondées sur la proposition des séquences d'agrégation successives, en alternance d'étapes de calcul et d'étapes de consultation avec le décideur. Le décideur donne des informations complémentaires sur ses préférences après analyse des résultats à chaque étape.

Ces échanges entre le décideur et l'homme d'étude se basent sur des questions du type : sur quel critère le décideur serait prêt à faire une concession et quelle quantité maximale $\Delta_j$ accepterait-il de concéder ? Quelle contrainte accepterait-il de relâcher ? Sur quelle contrainte accepterait-il d'être plus sévère ?, etc. Les réponses obtenues fournissent l'information qui doit être injectée dans le modèle utilisé et permettent la construction d'une nouvelle solution améliorée (Hammami, 2003).

### *5.4.4 Choix des méthodes multicritère d'aide à la décision*

La liste de méthodes multicritère d'aide à la décision qui existent actuellement est en constante évolution. Des nouvelles méthodes sont régulièrement créées, ou des améliorations sont apportées aux méthodes existantes afin de s'adapter aux nouveaux problèmes de décision qui apparaissent. Dans ce contexte, plusieurs démarches ont été développées pour choisir la méthode la plus adaptée à chaque problème.

Les hypothèses sur lesquelles se basent les méthodes multicritère, les caractéristiques des données d'entrée qu'elles sont susceptibles de manipuler, le type de résultats obtenus, etc., sont les éléments distinctifs sur lesquels s'appuient les méthodes de choix. Par exemple, (Guitouini et *al.*, 1999) propose une classification des méthodes multicritère en fonction des informations

constituant les données d'entrée (input) et des résultats (output). Cette classification est définie sur 24 catégories d'inputs et 7 d'outputs, ce qui correspond à une matrice de taille (23 x 7) où les différentes méthodes multicritère sont placées dans les cases correspondantes de la matrice (Annexe 2).

Néanmoins, ces approches demeurent très théoriques et nécessitent de grandes connaissances a priori sur les données traitées. Dans ce contexte, leur utilisation peut s'avérer complexe pour ceux qui ne sont pas spécialistes de l'analyse multicritère. Dans notre cas, nous proposons d'adopter dans notre recherche la démarche développée par (Lemaire, 2006). Cette démarche, plus intuitive et pratique, est basée sur un *arbre de décision* qui met en évidence d'une manière visuelle les éléments distinctifs des différentes méthodes multicritère. Une série de questions-réponses permet de se positionner sur les différentes branches de l'arbre jusqu'à identifier la méthode a priori la plus adaptée à chaque problème (fig. 5-4).

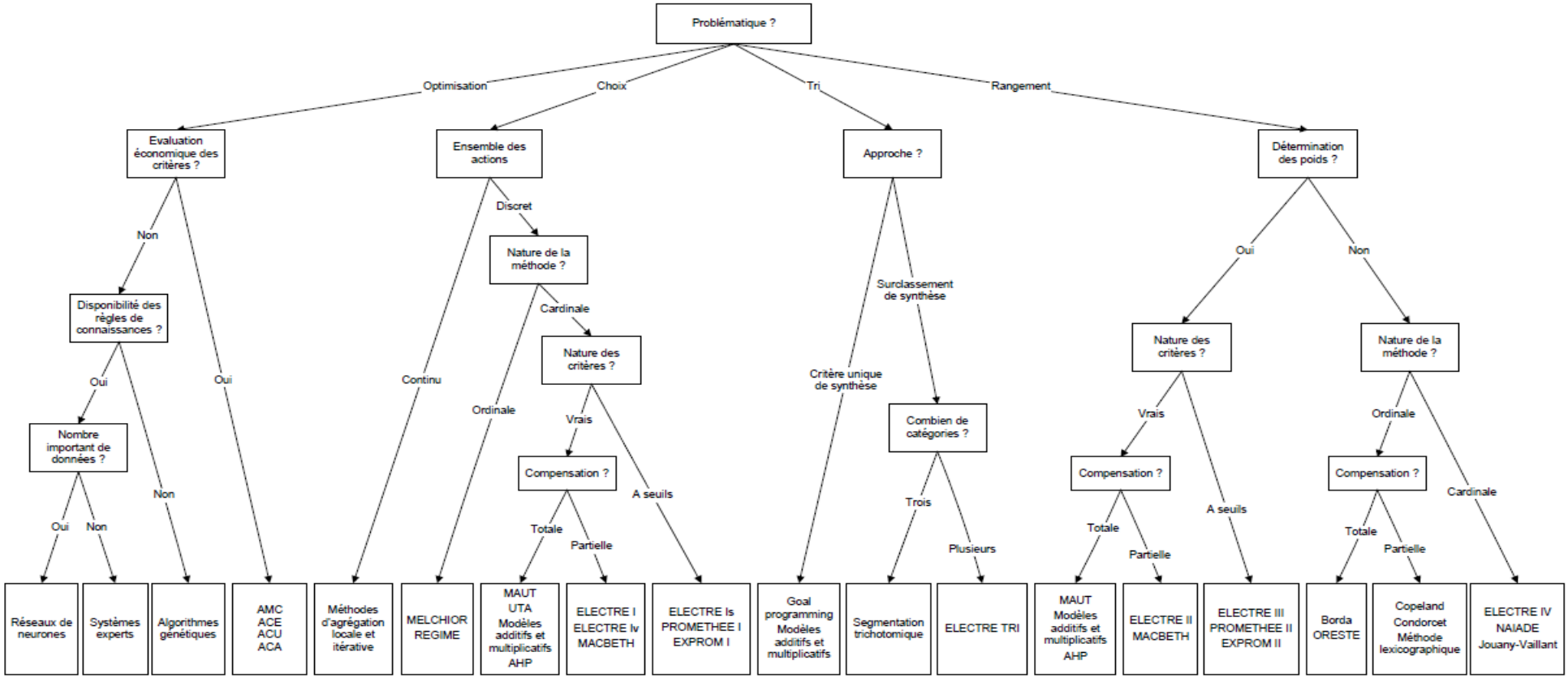



*Figure 5-4 : Arbre de décision des méthodes d'aide à la décision (Lemaire, 2006)*

Outre ces méthodes de choix, il est évident que la subjectivité des décideurs doit être considérée. (Schärlig, 1996) précise qu'il n'est pas interdit de faire jouer même des considérations de simplicité ou de rapidité dans les procédures de choix. Dans le cadre de notre recherche, face à la multiplicité des méthodes d'analyse multicritère, nous avons choisi de privilégier les méthodes reposant sur la relation de surclassement pour les raisons suivantes :

- Les méthodes de surclassement permettent de prendre en compte des critères aussi bien quantitatifs que qualitatifs, ce qui est le cas de la gestion patrimoniale où on doit considérer des critères de différentes natures (technique, économique, sociale, etc.) ;
- Les méthodes de surclassement permettent de garder les évaluations de chaque action sur l'échelle originale d'évaluation, au contraire d'autres méthodes comme celles de l'approche du critère unique de synthèse, qui exigent une même échelle pour tous les critères ;
- Enfin, les méthodes de surclassement permettent, lors de l'évaluation des actions à l'aide de critères, de prendre en compte l'imprécision des connaissances par l'introduction de seuils d'indifférence et de préférence. Comme nous avons évoqué dans le Chapitre 1, l'évaluation de l'état structurel des ouvrages présente des imprécisions dues à la variabilité indissociable aux actions de surveillance visuelle. Dans ces circonstances, il faut tenir compte de ces imprécisions pour exploiter les résultats de manière pertinente.

Concernant les méthodes de surclassement, dont les caractéristiques sont synthétisées dans le tableau 5-3, (Roy et Bouyssou, 1993) propose un guide qui se base en les étapes suivantes :

- Pour commencer, l'homme d'étude peut faire intervenir la problématique retenue pour restreindre l'ensemble des méthodes a priori envisageables. Faisons observer que, dans le cas de la *problématique de tri* (P.β.), il n'aura actuellement plus guère de possibilité de choix (selon le tableau 5-3, on retiendra la méthode ELECTRE TRI). Ce qui suit ne concerne donc que les problématiques de *choix* (P.α.) et de *rangement* (P.γ).
- On pourra restreindre encore l'éventail des méthodes possibles en prenant en considération les divers paramètres économiques (poids, seuils de véto et seuils de discrimination principalement) qu'il convient ou non de faire intervenir. Les options prises à ce niveau dépendent de la nature du problème mais aussi de la façon dont il est pris en compte par les divers intervenants et de l'information disponible.

  Le choix d'une méthode sera ainsi considérablement restreint s'il existe de bonnes raisons pour ne pas faire intervenir de pondérations, les seuils de véto, les seuils d'indifférence ou de préférence. Il pourra cependant être préférable de recourir à une méthode plus simple : par exemple ELECTRE I ou ELECTRE II dans le cas où tous les critères sont des « *vrais critères* ».

  Soulignons que, dans certains cas, la nécessité de recourir à une méthode simple ou encore familière à certains des intervenants peut imposer le choix d'une méthode, même si cela doit exclure la prise en compte de tel ou tel paramètre économique.
- Il est possible que l'homme d'étude ait encore, à ce niveau, le choix entre plusieurs méthodes. Il pourra alors faire intervenir sa subjectivité pour les différentes méthodes, lesquelles, jointes à quelques considérations d'ordre technique, lèveront généralement sans peine ses dernières hésitations.

| Méthodes | Problématique | Paramètres économiques | | | Caractéristiques du s.r.p. |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Seuils d'indifférence, préférence | Pondération | Véto | |
| ELECTRE I | α | Non | Oui | Oui | 1 relation nette de surclassement avec niveau de concordance |
| ELECTRE Is | α | Oui | Oui | oui | 1 relation nette de surclassement avec niveau de concordance +1 (éventuel) indicateur de robustesse |
| ELECTRE TRI | β | Oui | Oui | Oui | 1 relation nette de surclassement + des profils limites |
| ELECTRE II | γ | Non | Oui | oui | 2 relations emboîtées de surclassement avec niveaux de concordance |
| PROMETHEE | γ | Oui | Oui | non | 1 relation floue de préférence |
| ELECTRE III | γ | Oui | Oui | oui | 1 relation floue de surclassement |
| ELECTRE IV | γ | Oui | Non | Oui | De 2 à 5 relations emboîtées de surclassement |

*Tableau 5-3 : Caractéristiques des principales méthodes de type ELECTRE (Roy et Bouyssou, 1993)*

Pour réaliser le choix des méthodes multicritère qui nous serviront pour développer notre outil d'aide à la gestion du patrimoine de la RATP, nous nous baserons sur les méthodes de (Lemaire, 2006) et (Roy et Bouyssou, 1993). Notre choix sera déterminé en fonction du type des problématiques à résoudre et des caractéristiques de nos critères de décision. Ces informations seront détaillées dans le Chapitre 8, où nous procéderons au développement de notre démarche.

### 5.4.5 Synthèse

Les méthodes d'aide à la décision multicritère est un domaine très vaste et dépasse le cadre de ce chapitre (le lecteur intéressé peut se diriger vers (Hammami, 2003) et (Roy et Bouyssou, 1993). Nous avons présenté ici les trois catégories de méthodes existantes et une description plus détaillée des méthodes susceptibles d'être adaptées à notre problématique est disponible dans l'Annexe 2.

Dans un problème d'aide à la décision, il n'existe a priori pas de bonnes ou de mauvaises méthodes, mais plutôt une méthode mieux adaptée au problème de décision multicritère. Face à la multiplicité des méthodes d'analyse multicritère, différents outils de choix ont été développés (Annexe 2). Nous nous appuierons sur la méthode de l'*arbre de décision*, proposée par (Lemaire, 2006), dont l'application est simple et intuitive, et sur la méthode de (Roy et Bouyssou, 1993), qui permet de réaliser un choix plus fin parmi les différentes méthodes de surclassement.

Dans ce cas, le choix des méthodes multicritère qui permettront de construire un outil d'aide à la gestion du patrimoine RATP dépend des caractéristiques des critères et des problématiques à traiter. Nous ne serons en disposition de justifier notre choix que lorsque notre famille de critères sera construite et les problèmes de décision ont été définis (Chapitre 8).

# Synthèse de la Partie II

Nous avons présenté les différents outils scientifiques susceptibles d'être appliqués dans notre démarche pour développer un outil d'aide à la gestion du patrimoine de la RATP : les outils de la Sûreté de Fonctionnement et les méthodes d'aide à la décision multicritère.

Dans le Chapitre 4, nous avons présenté les outils de la Sûreté de Fonctionnement pour modéliser le fonctionnement des systèmes complexes. Ces outils, provenant du domaine du génie industriel, s'avèrent comme adaptés pour évaluer la performance des infrastructures de génie civil de la RATP. Nous proposons l'application de :

- L'***Analyse Fonctionnelle***, afin de modéliser le fonctionnement des tunnels en maçonnerie au sein de leur environnement, et les interactions de leurs composants au sein de la structure.
- L'***AMDE***. Cette méthode nous permettra de recenser de façon exhaustive les modes de défaillance et leurs effets dans les différentes phases de la vie des tunnels maçonnés.
- Les ***graphes causaux.*** Cette méthode nous permettra de structurer les séquences de défaillances des tunnels maçonnés et, de cette façon, de modéliser les mécanismes de dégradation de ces ouvrages.

***En outre, les résultats de la Sûreté de Fonctionnement permettront de structurer l'information disponible pour construire un critère d'évaluation de la performance comprenant la globalité des aspects techniques qui interviennent dans la gestion patrimoniale de la RATP. Des méthodes multicritère seront utilisées à cet effet.***

Dans le Chapitre 5, nous avons présenté les méthodes multicritère qui nous permettront, dans un premier temps, de construire les critères de décision et, dans un deuxième temps, de développer un outil d'aide à la décision multicritère.

***Nous avons introduit les différentes méthodes pour la construction de critères de décision. La méthode d'agrégation par règles s'avère comme la plus adaptée dans un contexte de gestion patrimoniale, où les conséquences à considérer sont nombreuses et de différentes natures. En outre, la transparence de cette méthode permet aux décideurs de se familiariser avec la structure des critères dès l'origine et diminue les effets de « boîte noire ». Cette méthode sera utilisée pour la construction d'un critère technique de performance à partir des résultats de l'application des outils de la Sûreté de Fonctionnement, et pour la construction des critères de gestion patrimoniale à partir de la formalisation de l'expertise des gestionnaires de la RATP.***

***Enfin, nous avons introduit les différentes méthodes d'aide à la décision multicritère qui nous permettront de développer un outil d'aide à la gestion du patrimoine RATP. Nous proposons l'utilisation des méthodes de surclassement. Ces méthodes s'avèrent comme adaptées à notre problématique vu qu'elles permettent de prendre en compte des critères hétérogènes et les imprécisions des données.***

L'application pratique de ces éléments théoriques sera réalisée dans la Partie III.

# Partie III
# Eléments de réponse pratiques : développement d'un outil d'aide à la gestion du patrimoine de la RATP

# Introduction de la Partie III

Comme il a été indiqué dans le Chapitre 1, l'évaluation technique des ouvrages de la RATP est principalement basée sur des actions de surveillance visuelle. Les résultats de la surveillance sont matérialisés grâce à la notation MARION (§ 1.2).

La figure III-1 montre la répartition des notes de l'ensemble des procès-verbaux MARION ; on peut y apprécier une forte concentration de notes 2 et 3 :

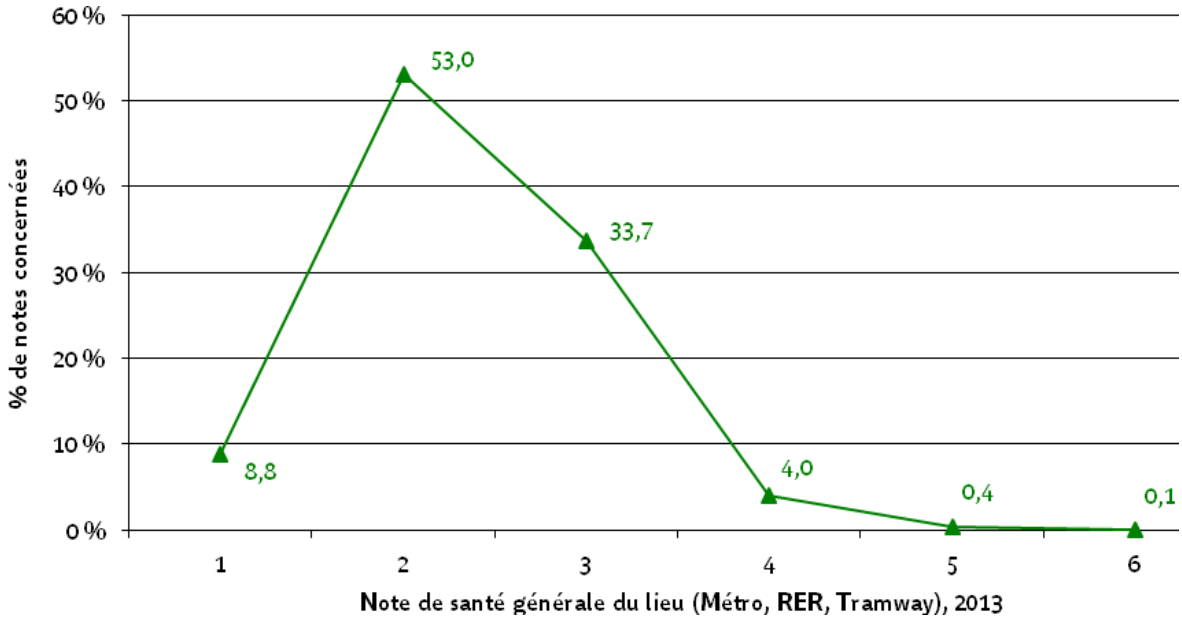



*Figure III-1 : Répartition des notes des Procès-Verbaux MARION, année 2013 (Mirouze, 2014)*

Cette notation n'est donc pas assez discriminante et pose des difficultés pour définir une priorisation des ouvrages à traiter. Dans ces circonstances, il s'avère nécessaire de développer une notation plus discriminante. Pour ce faire, nous proposons de compléter la note MARION avec l'évaluation des différents aspects qui interviennent dans le processus décisionnel de la gestion patrimoniale de la RATP, mais qui ne sont pas représentés par la note MARION. Ces aspects sont considérés par les gestionnaires de la RATP en fonction de leur expertise. Cependant, à ce moment, il n'y a pas de méthodologie établie permettant de les considérer d'une manière transparente et optimisée. Dans ce contexte, nous proposons de formaliser ces aspects sous la forme de critères de décision en poursuivant un double objectif :

- structurer l'information qui intervient dans le processus décisionnel et ;
- établir un système d'évaluation permettant de représenter les préférences des décideurs.

Afin de représenter d'une manière exhaustive tous les aspects intervenant dans le processus décisionnel de la gestion patrimoniale de la RATP, nous proposons la construction d'une famille cohérente de critères de décision à partir de deux grands groupes (fig. III-2) :

- Les *aspects techniques*, qui comprennent la note MARION, l'historique des ouvrages et la description de l'environnement. Ces aspects techniques seront synthétisés sous la forme d'un *critère de* « ***performance*** ».
- Les *aspects socio-économiques*, tels que les impacts en cas de défaillance, l'importance stratégique des ouvrages, la coordination des travaux de maintenance, etc. Ces aspects seront formalisés sous la forme de *critères de gestion patrimoniale*.

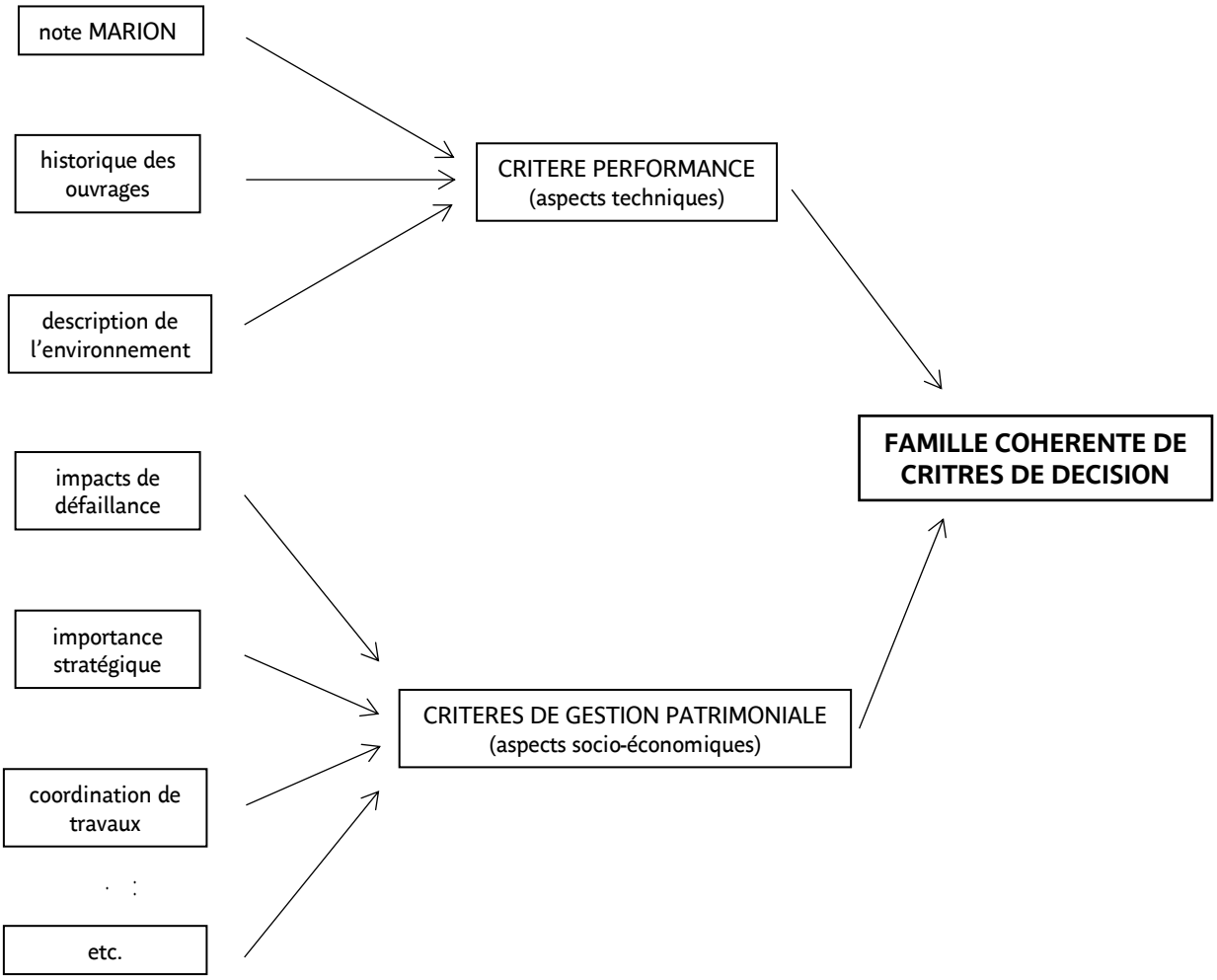



*Figure III-2 : Démarche pour la construction d'une famille cohérente de critères de décision adaptée à la gestion patrimoniale de la RATP*

Pour la construction d'un *critère de* « ***performance*** », nous réalisons, dans un premier temps, une modélisation fonctionnelle à partir de l'application des outils de la Sûreté de Fonctionnement (Chapitre 6) (étape 1, fig. 3-1). Ensuite, à partir de ces résultats, le *critère de* « ***performance*** » sera construit à partir d'une méthode d'aide à la décision multicritère : l'affectation à base de règles (§ 7.1) (étape 2, fig. 3-1). Cette même méthode multicritère sera appliquée dans la section 7.2 pour construire les *critères de gestion patrimoniale* à partir de la formalisation de l'expertise (étape 2, fig. 3-1). Enfin, une fois notre famille cohérente de critères de décision définie, nous procédons à la construction d'un outil multicritère d'aide à la décision pour la gestion du patrimoine RATP dans le Chapitre 8 (étape 3, fig. 3-1).

# Chapitre 6. Modélisation fonctionnelle des mécanismes de dégradation des tunnels maçonnés

On peut considérer que la note MARION n'est qu'un des aspects faisant partie de l'évaluation de la performance des ouvrages, car elle représente uniquement l'évaluation des désordres relevés grâce aux actions de surveillance visuelle. L'agressivité de l'environnement des ouvrages, les risques associés, l'historique des travaux de réhabilitation… sont d'autres aspects de la performance qui sont considérés par les gestionnaires de la RATP pour configurer les programmes de maintenance. Néanmoins, la manière dont ils sont pris en compte n'est pas formalisée à ce moment. Nous proposons donc de compléter la note MARION avec une évaluation de ces éléments, afin d'obtenir une évaluation plus exhaustive de la performance et de synthétiser, dans un seul critère, les différents aspects techniques qui interviennent dans la gestion patrimoniale de la RATP. Dans la suite du document, cette évolution de la note MARION sera représentée par le *critère de* « ***performance*** ».

Pour la construction d'un *critère de* « ***performance*** » nous avons comme information disponible : les résultats issus des inspections visuelles (note MARION), l'historique des ouvrages, la description de l'environnement et l'expertise des gestionnaires de la RATP. Nous proposons une démarche fondée sur deux étapes. Dans un premier temps, nous proposons une modélisation fonctionnelle des tunnels maçonnés. Ensuite, à partir des résultats obtenus, nous appliquerons la méthode d'affectation à base de règles pour construire un *critère de* « ***performance*** » (figure 3-2).

Dans un contexte de gestion patrimoniale, il est essentiel de connaitre comment les infrastructures fonctionnement, se dégradent et interagissent avec leur environnement. L'étude de l'état de l'art que nous avons réalisée (Chapitre 2) nous a montré que les outils de la Sûreté de Fonctionnement sont adaptés à cet effet.

Nous présentons ici l'application de ces outils aux tunnels maçonnés du réseau de la RATP. Avec la modélisation du fonctionnement et des mécanismes de dégradation de ces ouvrages nous visons à identifier quel est le rôle des éléments intrinsèques à l'ouvrage et de son environnement contribuant à la dégradation des tunnels maçonnés, et les impacts qui peuvent avoir lieu en cas de défaillance du système. Ces résultats nous permettront d'identifier et de structurer l'information dont nous nous servirons pour la construction du *critère de* « ***performance*** » dans la suite du document (§ 7.1).

## 6.1 *Analyse Fonctionnelle des tunnels maçonnés*

### *6.1.1 Analyse Fonctionnelle Externe*

La gestion du patrimoine nécessite de prendre en compte non seulement le patrimoine d'infrastructures, mais aussi son environnement urbain, humain et technique (Louis, 1997). L'environnement doit être compris dans son sens le plus large : environnement extérieur (terrain encaissant, voirie, bâtiments, réseaux concessionnaires, etc.) et intérieur (dans le cas de nos tunnels maçonnés, circulation du matériel roulant et voyageurs). L'Analyse Fonctionnelle Externe (fig. 6-1) nous permet de définir d'un côté les limites du système et, de l'autre, de décrire le milieu extérieur.

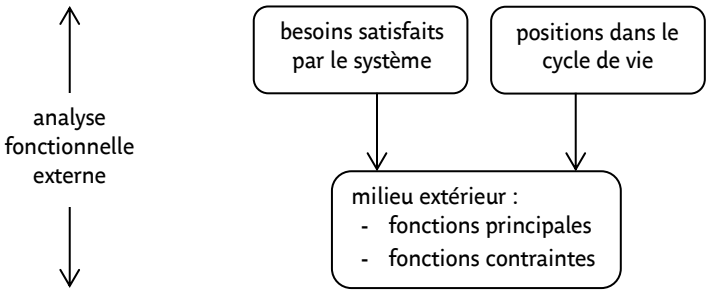



*Figure 6-1 : Démarche de l'Analyse Fonctionnelle Externe (Peyras, 2003)*

Selon (Villemeur, 1988), un système est un ensemble déterminé d'éléments discrets (ou composants) interconnectés ou en interaction. Nous avons défini notre système « ***tunnel maçonné*** » comme l'ensemble de composants interconnectés ou en interaction qui composent l'infrastructure de génie civil. Le reste des éléments (comme la plateforme de roulement ou le matériel roulant) sont considérés comme faisant partie du milieu extérieur.

La figure 6-2 représente notre système intégré dans son environnement. Les composants du système sont dessinés en noir et les éléments du milieu extérieur sont représentés en rouge.

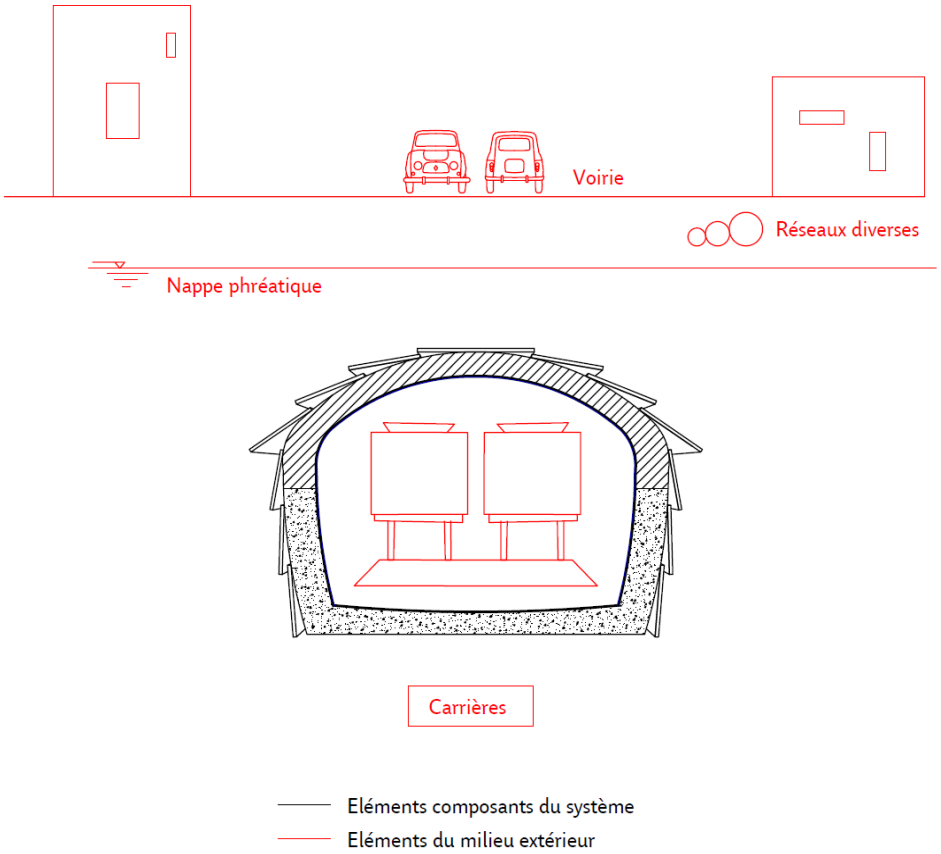



*Figure 6-2 : Analyse fonctionnelle externe : définition du système et du milieu extérieur*

L'analyse fonctionnelle externe du système permet d'identifier les besoins satisfaits par le système et les fonctions contraintes. Les résultats sont synthétisés dans le tableau 6-1.

| Fonction Principale | Fonctions Contraintes |
|---|---|
| Permettre la circulation ferroviaire | Assurer la sécurité de l'ouvrage |
| | Assurer le niveau de performance exigé par l'exploitation |
| | Etre pérenne |

*Tableau 6-1 : Tableau d'Analyse Fonctionnelle Externe*

### 6.1.2 *Analyse Fonctionnelle Interne*

Nous recherchons ici le rôle des composants du tunnel maçonné, chacun assurant des fonctions contribuant au fonctionnement global du tunnel : ce sont les fonctions de conception. Notre démarche pour l'analyse fonctionnelle est présentée sur la figure 6-3 :

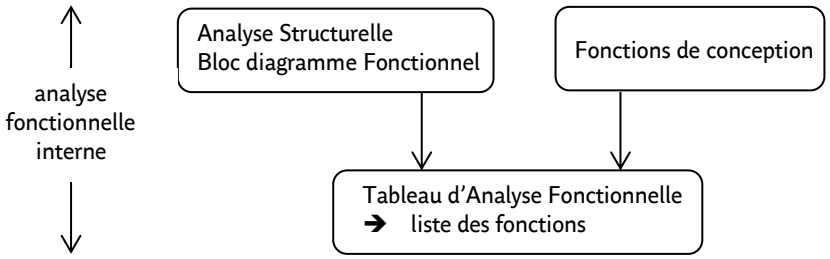



*Figure 6-3 : Démarche de l'Analyse Fonctionnelle Interne (Peyras, 2003)*

Avant de procéder aux développements méthodologiques présentés ici, il s'avère nécessaire de définir la granularité spatiale à adopter pour notre étude.

### *6.1.3 Choix de la granularité spatiale*

La granularité spatiale correspond à l'échelle spatiale de description d'un système (Peyras, 2003).

En préliminaire à l'Analyse Structurelle du système, il est nécessaire de fixer la granularité spatiale adaptée aux besoins de l'étude : il s'agit de choisir à quel niveau de précision nous souhaitons produire notre analyse.

Nous distinguons trois niveaux de granularité :

- La **granularité supérieure**, qui correspond au système dans sa globalité. Ce niveau de granularité analyse les effets des défaillances sur la globalité de l'ouvrage (le tunnel) ;
- La **granularité intermédiaire**, qui découpe le système en composants distincts ;
- La **granularité inférieure**, qui s'intéresse aux sous-composants et aux matériaux des composants de granularité intermédiaire.

Bien entendu, des analyses plus précises pourraient être réalisées, selon les besoins, à des granularités plus fines (au sein des matériaux) ou plus larges (à l'échelle du réseau de transport RATP).

Les processus physiques de dégradation des tunnels maçonnés peuvent avoir leur origine au sein des matériaux (comme par exemple, la dégradation de la maçonnerie par attaque des eaux sulfatiques). Dans ce cas, notre analyse exigerait une granularité fine à l'échelle des matériaux. Néanmoins, les inspections et les principaux travaux de réhabilitation sont réalisés à l'échelle du composant. Dans ce contexte, nous adoptons l'échelle spatiale du composant pour réaliser notre Analyse Fonctionnelle.

### *6.1.4 L'Analyse Structurelle des tunnels en maçonnerie*

L'Analyse Structurelle (AS) permet de lister tous les composants constitutifs du système, de repérer leur position physique au sein de l'ouvrage et de déterminer les interactions avec les autres composants.

Elle consiste à découper l'ouvrage en composants ou sous-composants (ou matériaux), afin d'en construire une vision plus précise. Dans notre analyse, le découpage est effectué à la granularité du composant.

On procède ensuite à l'Analyse Structurelle des différentes catégories de tunnels maçonnés qui existent, en fonction de l'environnement dans lequel ils ont été construits (Annexe 1). Cette analyse a conduit à identifier, dans le patrimoine RATP, différents profils que nous simplifions dans un seul modèle d'étude qui comprend tous les composants identifiés. De cette façon, nous obtenons une section fictive de tunnel maçonné mais représentative de tous les cas existants (fig. 6-4).

Les composants du système qui sont toujours présents sont représentés par un trait foncé. Ceux qui ne sont présents qu'en fonction de l'environnement dans lequel ils se trouvent (contact avec la nappe phréatique, carrières, etc.) sont représentés par un trait pointillé (les éléments du milieu extérieur au système sont représentés par un trait rouge).

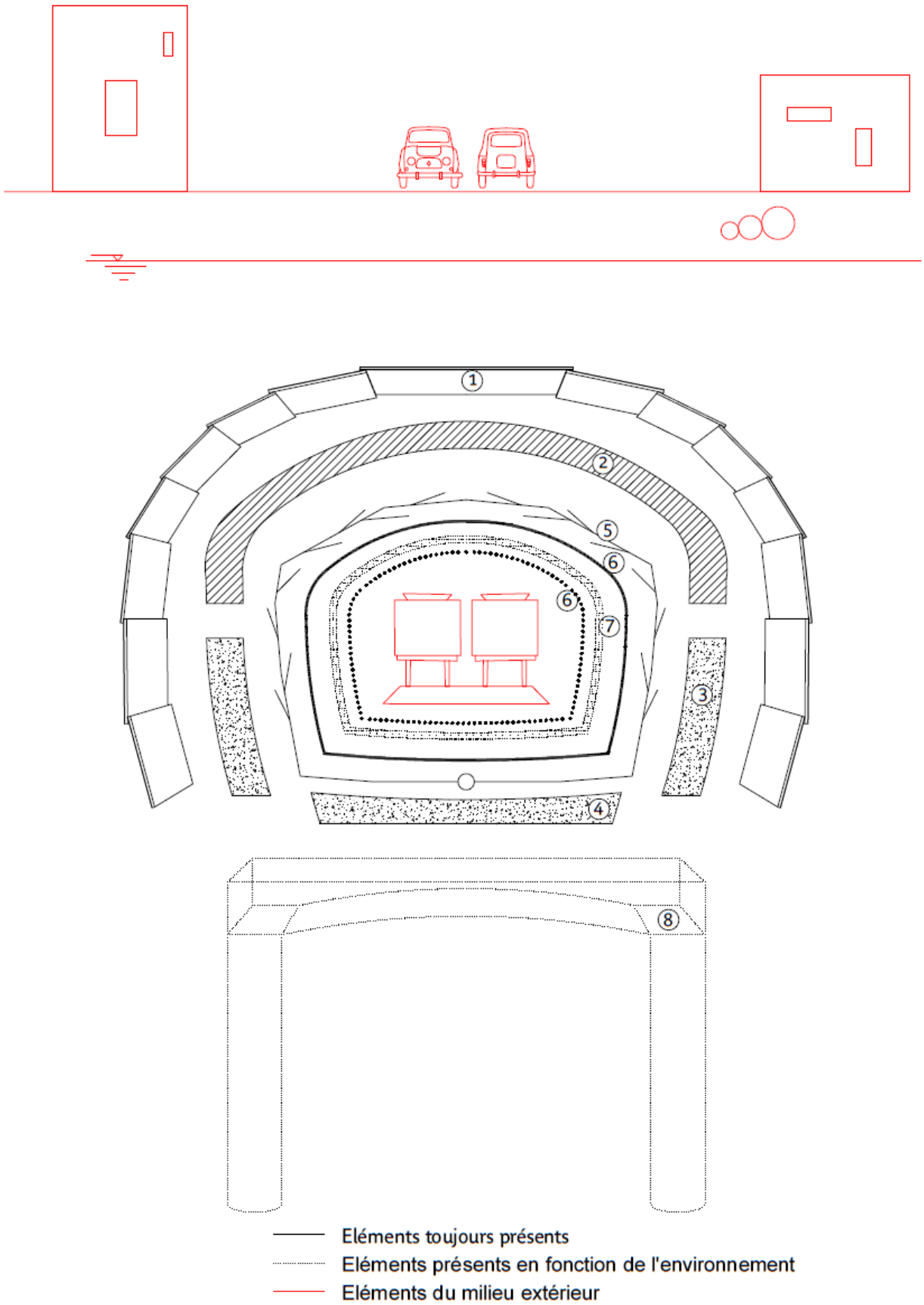



*Figure 6-4 : Analyse Structurelle du modèle d'étude (Paterna et al., 2014)*

A partir de l'Analyse Structurelle de ce modèle d'étude, nous déterminons l'ensemble des composants, regroupés dans un tableau (tab.6-2):

| N° | Composant | Nature possible |
|---|---|---|
| 1 | Bois de blindage | Bois |
| 2 | Voûte | Maçonnerie de meulière ou pierres calcaires |
| 3 | Piédroit | Maçonnerie en béton grossier |
| 4 | Radier | Maçonnerie en béton grossier |
| 5 | Drains | (Vide) |
| 6 | Enduit | Ciment |
| 7 | *Revêtement intérieur (en cas de contact avec la nappe phréatique)** | Brique ou béton gravillon |
| 8 | *Renforcement en zone de carrières** | Béton armé |

* Eléments présents en fonction de l'environnement

*Tableau 6-2 : Analyse Structurelle du modèle d'étude*

Nous obtenons huit composants pour notre modèle d'étude. A chacun d'entre eux sont associés un numéro de nomenclature et une description de la nature des matériaux pouvant rentrer dans la constitution des composants.

### *6.1.5 Les fonctions de conception des tunnels maçonnés*

Les fonctions de conception que réalisent les composants du système sous-entendent des fonctions de contact et de flux. Elles expriment les interactions des composants entre eux, mais aussi entre les composants et les milieux extérieurs. De cette façon, on peut comprendre comment l'environnement peut dégrader le système et, dans le sens inverse, comment le système peut affecter son environnement en cas de défaillance. Ces interactions sont matérialisées au moyen de schémas : les Blocs diagrammes Fonctionnels (BdF) établis à l'échelle du composant (fig. 6-5). Nous étudions les interactions liées aux contacts, aux sollicitations mécaniques et aux écoulements (flux hydrauliques et flux hydrodynamiques).

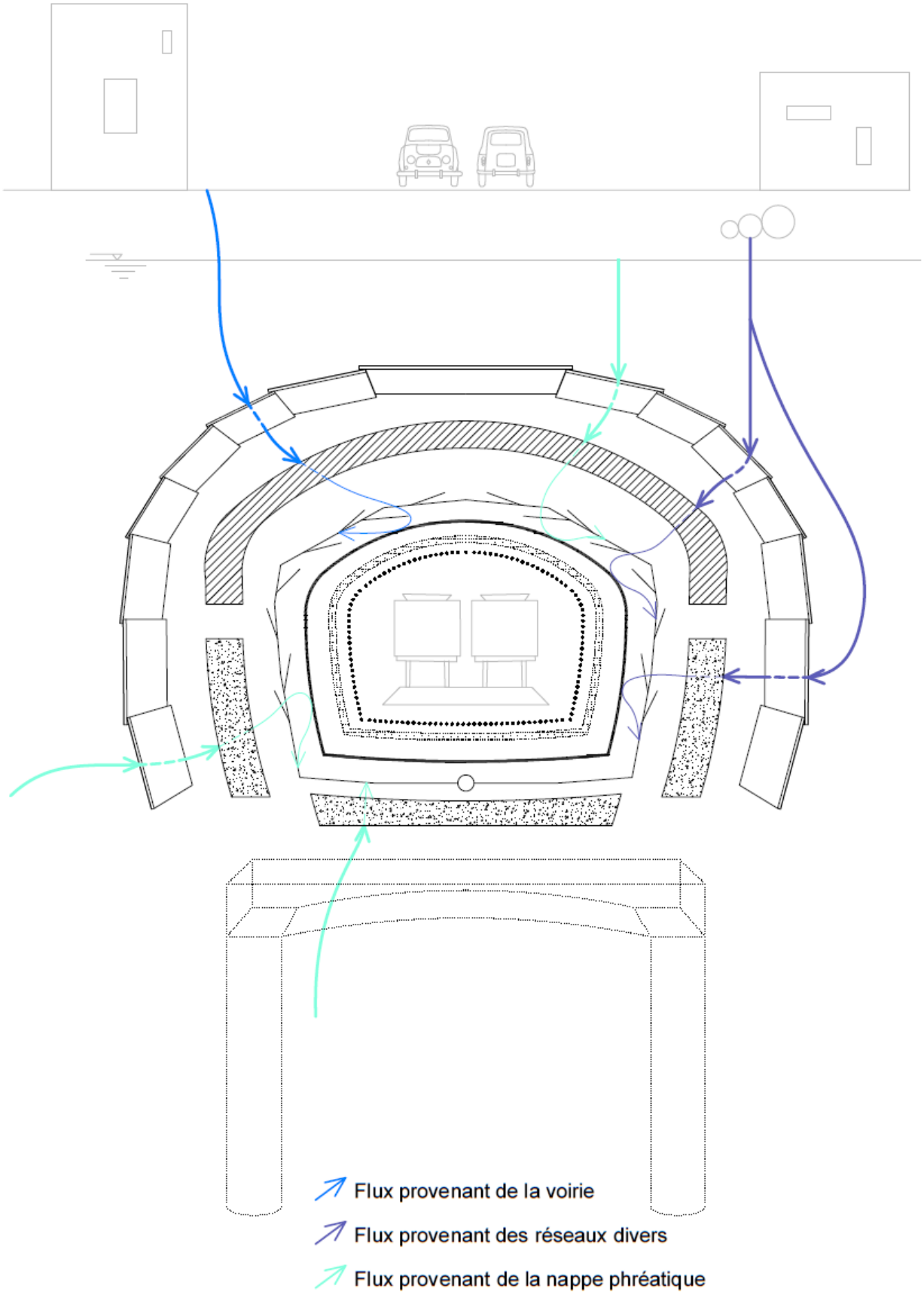



*Figure 6-5 : Bloc diagramme Fonctionnel relatif aux interactions de flux hydrauliques (Paterna et al., 2014)*

Nous avons construit quatre Blocs diagrammes Fonctionnels différents représentant quatre types de relations possibles :

- Les relations de contact (contacts entre les éléments et l'environnement) ;
- Les relations de flux hydrauliques (circulation de l'eau) ;
- Les relations de flux de charges (forces agissantes) ;
- Les relations de flux liées aux sollicitations hydromécaniques (érosion et colmatage).

Les trois autres Blocs diagrammes Fonctionnels sont présentés en Annexe 4.

L'analyse des Blocs diagrammes Fonctionnels permet d'obtenir les fonctions de conception des composants, regroupées dans les Tableaux d'Analyse Fonctionnelle (tab.6-3) et classées selon l'origine de l'interaction (contacts, sollicitations mécaniques, flux hydrauliques…).

| N° | Composant | Fonctions de conception |
|---|---|---|
| 1 | Bois de blindage | **1. Préparer les éléments en contact :**<br>- Assurer le contact entre le terrain encaissant et le revêtement<br>**2. Résister aux sollicitations des charges* :**<br>- Assurer la stabilité du terrain encaissant lors du creusement du tunnel<br>**3. Transmettre les sollicitations des charges :**<br>- Transmettre les efforts de l'encaissant vers le revêtement<br>- Transmettre les charges de la voirie vers la voûte<br>**4. Résister aux flux hydromécaniques :**<br>- Etre durable face aux variations d'humidité qui provoquent sa pourriture et dégradation |

* Cette fonction correspond à la phase de construction des tunnels maçonnés. Même si notre AMDE se concentre uniquement sur la phase d'exploitation de l'ouvrage, on considère convenable de l'indiquer ici quand même, afin de mieux représenter les particularités de fonctionnement de ce composant

*Tableau 6-3 : Tableau d'Analyse Fonctionnelle (extrait)*

Ce tableau synthétise l'Analyse Fonctionnelle et récapitule, pour chaque composant, les fonctions de conception qu'il accomplit, classées selon leurs origines : contact, hydraulique, hydromécanique et des flux de charge (cf. Annexe 5).

### *6.1.6 Synthèse*

Nous avons appliqué l'Analyse Fonctionnelle aux tunnels en maçonnerie. Cette analyse recense de manière exhaustive tous les éléments du système (Analyse Structurelle). Les résultats de l'Analyse Fonctionnelle Externe nous permettent, d'une part, de déterminer le besoin principal satisfait par le système et les fonctions contraintes ; d'autre part, d'identifier les interactions du système avec le milieu extérieur. Ce dernier aspect est essentiel pour identifier les contraintes externes qui interviennent dans la gestion du patrimoine et qui seront modélisées dans la section 7.2 *Construction des critères intervenant dans la gestion patrimoniale de la RATP*. Grâce à l'Analyse Fonctionnelle Interne, on obtient les interactions entre chaque composant du système et celles avec l'environnement extérieur. Elle aboutit à la liste des fonctions principales du système et aux fonctions de conception des composants.

Les résultats obtenus serviront de base à la réalisation de l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets. Cette analyse nous permet de déterminer les causes qui dégradent les fonctions de conception et les effets qui en découlent.

## 6.2 *L'AMDE appliquée aux tunnels maçonnés*

L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) détermine, pour chaque fonction accomplie par les composants du tunnel maçonné, leurs modes de défaillance susceptibles d'apparaître aux différents cycles de la vie de l'ouvrage, leurs causes et leurs effets. Outre la connaissance précise des séquences de défaillance, l'AMDE va alors nous permettre de structurer les informations relatives aux dégradations des tunnels.

Pour notre problématique, nous simplifions la démarche générale de l'AMDE proposée dans l'industrie et nous ne réalisons qu'une AMDE Produit visant à déterminer les défaillances des tunnels en phase d'exploitation, éventuellement liées au processus de conception et de réalisation des ouvrages.

Cette simplification (fig. 6-6) conduit à ne pas produire d'AMDE Processus, qui dans notre cas ne présente pas d'intérêt. En effet, les tunnels maçonnés de la RATP sont des ouvrages généralement anciens, pour lesquels on ne dispose que de peu d'informations relatives au processus de conception et de réalisation. En outre, la méthode de construction franco-Belge est considérée comme obsolète, il n'y a pas de sens à viser à améliorer ce processus dans notre étude.

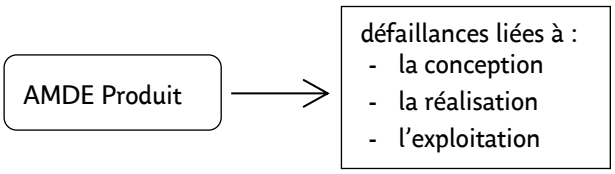



*Figure 6-6 : Démarche AMDE utilisée pour les tunnels maçonnés*

Nous recherchons avec l'AMDE (Produit) les différents modes de défaillance de l'ouvrage en service, liés au processus de conception et de réalisation, comme aux aléas pouvant apparaître lors de son exploitation. L'analyse adoptée est similaire à celle utilisée sur les digues (Serre, 2005).

L'AMDE doit être adaptée à notre contexte et à nos objectifs de structuration des informations et de modélisation des scénarios de dégradation. Pour cela, et afin de bien rendre compte des liens de causalité entre les phénomènes et les modes de défaillance, nous définissons rigoureusement chaque paramètre du tableau AMDE et la façon dont il est formellement obtenu : mode de défaillance, cause, effet, symptôme et moyen de détection (tab.6-4).

| n° | composant | fonction | mode de défaillance | cause possible de la défaillance | effet possible de la défaillance | symptôme de la défaillance | moyen de détection |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |

*Tableau 6-4 : Structure de l'AMDE adaptée aux tunnels maçonnés*

- Les colonnes 1 et 2 correspondent respectivement au numéro du composant et à son nom, déterminés lors de la décomposition structurelle du système (AS).
- La colonne 3 récapitule les fonctions de conception des composants obtenues à partir de l'Analyse Fonctionnelle (§ 6.1).

- La colonne 4 liste les modes de défaillance possibles de chaque composant. Nous distinguons deux types de mode de défaillance :
  - La dégradation d'une fonction, qui correspond à une fonction partiellement ou mal réalisée ;
  - La défaillance (totale) d'une fonction, pouvant correspondre, d'une part, à une fonction qui était réalisée et qui ne l'est plus, d'autre part, à une fonction qui n'a jamais été réalisée.
- La colonne 5 liste les causes possibles de la défaillance. Nous obtenons les causes de défaillance d'un composant à partir des Blocs diagrammes Fonctionnels (BdF) (Annexe 4). Elles ont donc pour origine les différents flux circulant dans le tunnel maçonné, les contacts avec les milieux extérieurs ou les composants environnants, l'état intrinsèque du composant et le processus de conception ou de réalisation du composant. Ces résultats sont complétés par les informations disponibles sur les fiches du Schéma Directeur de la Maintenance de la RATP (SDM, 2009) et le recueil de l'expertise.
- La colonne 6 recense les effets possibles de la défaillance. De façon analogue aux causes, les BdF, l'analyse du Schéma Directeur de la Maintenance de la RATP (SDM, 2009) et le recueil de l'expertise donnent les effets possibles d'une défaillance. On distingue trois catégories de conséquences, selon qu'elles portent sur l'état intrinsèque du composant, les flux émis par le composant, les contacts avec les milieux extérieurs ou les composants environnants.
- Les colonnes 7 et 8 présentent respectivement les symptômes par lesquels se manifestent les défaillances et leurs moyens de détection.

Dans le tableau 6-5 nous présentons un extrait de l'AMDE que nous avons réalisée pour les tunnels maçonnés. Le tableau complet, reporté en Annexe 6, analyse tous les composants du modèle d'étude.

| N° | Composant | Fonctions de conception | Mode de Défaillance | Cause possible de la défaillance | Effet possible de la défaillance | Symptôme de la défaillance | Moyen de détection |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | **Bois de blindage** | **1. Préparer les éléments en contact :**<br>- Assurer le contact entre le terrain encaissant et le revêtement | La fonction « assurer le contact entre le terrain et la maçonnerie en service » est dégradée ou est défaillante | **Processus conception-réalisation**<br>- Méthode de construction<br><br>**Etat intrinsèque du composant**<br>- Pourrissement et décomposition du bois de blindage<br><br>**Contact**<br>- Vides à l'extrados par altération physico-chimique de l'encaissant | **Contact**<br>- Déformation de la section du tunnel | - Constat de vides en extrados<br>- Abaissement de la voûte<br>- Ecartement des piédroits<br>- Fissures longitudinales en clé de voûte<br>- Décollement d'enduit (ou du carrelage dans les points d'arrêt) dans la zone des reins de la voûte | - Carottages de reconnaissance<br>- Mesures topographiques<br>- Mesures topographiques<br>- Observation visuelle<br>- Fissuromètres<br><br>- Observation visuelle |

*Tableau 6-5 : L'AMDE adaptée aux tunnels maçonnés (extrait du composant « bois de blindage »)*

Dans l'application de notre AMDE, et afin d'obtenir une analyse homogène, nous avons tâché de ne jamais mélanger les granularités d'analyse des défaillances et rester à l'échelle du composant. L'examen des répercussions des défaillances des composants sur le système global sera traité dans *§ 6.3 Modèle qualitatif de scénario de dégradation des tunnels maçonnés*, où nous enchaînerons les causes des défaillances et leurs effets afin d'obtenir des séquences consécutives de modes de défaillance.

Comme nous l'avons indiqué dans (§ 1.1.3.3), les tunnels en maçonnerie présentent des désordres redondants et qui se bouclent, donnant lieu à des cercles vicieux de dégradation où tous les effets sont susceptibles de produire de nouveaux modes de défaillance. Afin de gagner de la lisibilité dans le tableau de résultats de l'AMDE, nous avons groupé tous les effets dans une seule catégorie, sans distinction entre effets directs ou indirects, locaux ou globaux, etc. Ces types de nuances seront représentés par le modèle qualitatif de la dégradation des tunnels maçonnés que nous développons ultérieurement dans nos travaux de recherche (§ 6.3).

Il faut mentionner aussi la difficulté, voire l'impossibilité de recenser exhaustivement tous les causes et effets possibles des modes de défaillance des tunnels maçonnés. En effet, une démarche systématique et itérative donne des causes et effets très nombreux et divers. Il est donc nécessaire d'intégrer une part d'expertise et d'établir un tri des informations obtenues.

Ainsi, si nous pouvons considérer que l'ensemble des modes de défaillance a été envisagé (dans les limites de la précision de l'Analyse Fonctionnelle préalable), nous n'avons retenu que les causes et effets pertinents et susceptibles d'apparaître dans les mécanismes de vieillissement (et pas, par exemple, les cas d'accident d'exploitation, inondation, etc.).

## 6.3 *Modèle qualitatif de scénario de dégradation des tunnels maçonnés*

Le principe des méthodes de modélisation des défaillances fonctionnelles est d'établir, a priori et de manière formelle et exhaustive, les liens entre les causes initiales des défaillances et leurs effets.

A partir de l'AMDE, nous avons organisé l'information relative aux mécanismes de dégradation des tunnels maçonnés. Sur ces bases, les modèles du raisonnement qualitatif nous permettent de proposer un modèle pour la représentation des mécanismes sous la forme de scénarios où ces séquences de défaillance permettent d'organiser clairement ces liens entre causes et effets (fig. 6-7).

Pour ce faire, et à l'instar du modèle proposé dans (Peyras, 2003), nous utilisons les graphes causaux pour représenter les scénarios de dégradation des tunnels : chaque mécanisme est modélisé dans un graphe décrivant les processus fonctionnels des défaillances.

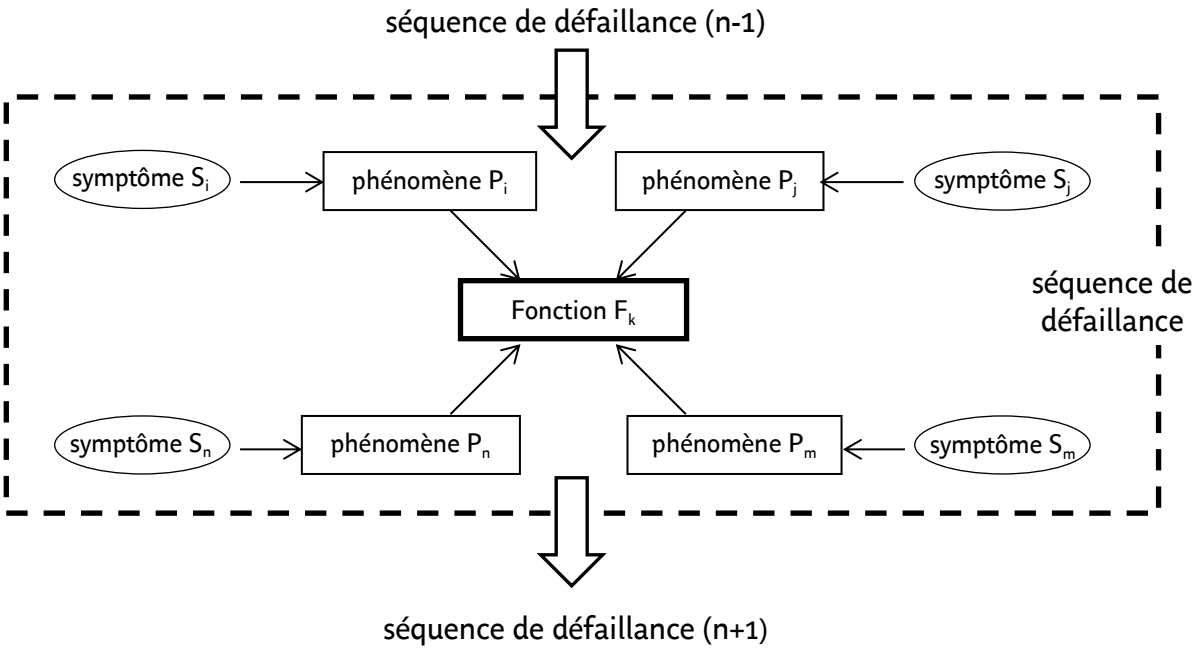



*Figure 6-7 : Schéma conceptuel pour la représentation des scénarios de dégradation (Peyras, 2003. Cf. page 91)*

Le modèle proposé consiste à construire les scénarios de dégradation des tunnels maçonnés en enchaînant les causes aux modes de défaillance, puis aux effets, ces derniers se traduisant par des symptômes.

Les scénarios de dégradation des tunnels ainsi modélisés enchaînent des séquences chronologiques de défaillance, représentant les mécanismes physiques se produisant au sein du système et conduisant à des pertes ou à des dégradations de fonctions. Les séquences de défaillance sont déclenchées dès que les effets d'un mode de défaillance sont suffisamment importants pour devenir des causes d'un nouveau mode de défaillance.

Ce modèle de représentation des scénarios comporte trois catégories de variables : les variables « *fonction* », correspondant aux modes de défaillance, les variables « *phénomène* » regroupant les causes et effets des modes de défaillance, et les variables « *symptôme* » correspondant aux manifestations des phénomènes (fig. 6-8). Ce modèle est appliqué pour le mécanisme de dégradation du tunnel maçonné sur la figure 6-10.

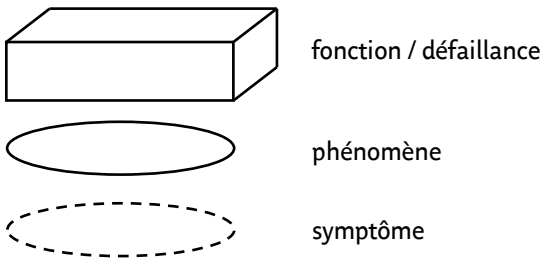



*Figure 6-8 : Représentation des variables dans le graphe causal*

Les variables « *phénomène* » sont renseignées par les variables « *symptôme* », qui traduisent la manifestation des mécanismes (symptôme ⇒phénomène). Les combinaisons de variables « *phénomène* » vont conduire à la dégradation d'une (ou des) variable(s) « *fonction* », la perte de performance de cette dernière produisant à nouveau une nouvelle séquence de « *phénomènes* » (phénomènes ⇒ fonction ⇒ phénomènes). L'enchaînement des défaillances sous forme « de

phénomènes impliquant des dégradations de fonctions, impliquant de nouveaux phénomènes » constitue le principe de la modélisation des mécanismes de dégradation des tunnels maçonnés sous la forme scénario.

Les phénomènes (les causes et effets des modes de défaillance) intervenant dans les mécanismes de dégradation des tunnels en maçonnerie sont répertoriés et classés selon l'origine:

- ***Etat intrinsèque du composant*** : déformation, fissuration, altération physico-chimique, colmatage, composition ;
- ***Flux hydraulique*** : eau d'infiltration provenant de la voirie, les réseaux divers ou la nappe phréatique ;
- ***Les sollicitations mécaniques*** : efforts du terrain encaissant, charges de la voirie, charges d'exploitation, poussée hydrostatique ;
- ***Les sollicitations hydromécaniques*** : altération physico-chimique, colmatage ;
- ***La conception et la réalisation*** : perméabilité, drainage, mise en œuvre.

Nous distinguons trois catégories de symptômes traduisant les phénomènes dans les mécanismes :

- ***Les symptômes visuels*** sont détectés par l'observation visuelle d'un visiteur d'ouvrages d'art ou d'un expert : érosion, fissuration, désordres, etc. ;
- ***Les symptômes mesurés*** sont issus d'une mesure d'auscultation ou d'un essai in situ ou au laboratoire : carottages de reconnaissance, mesures topographiques, etc. ;
- ***Les symptômes calculés*** sont obtenus à partir d'un calcul faisant intervenir des symptômes auscultés.

Un tel modèle présente de nombreux avantages : il structure la connaissance experte sous forme de scénarios fonctionnels, il organise l'information liée au mécanisme autour de trois catégories de variables (fonction, phénomène et symptôme) et il permet de prendre en compte les dégradations partielles et progressives des variables et les mécanismes non chronologiques (Peyras, 2003).

La contribution de l'expertise est essentielle pour notre démarche. (Lannoy *et al.*, 2005) montre toute l'importance en Sûreté de Fonctionnement d'être en corrélation avec « l'expérience » acquise lors de la vie du système. En effet, considérer l'ensemble des dégradations est de l'ordre de l'impraticable, ne serait-ce que pour un système ne comprenant que quelques éléments (Price *et al.*, 2001). Dans ces circonstances, l'apport de l'expérience est nécessaire pour assurer la lisibilité des résultats et la facilité de leur interprétation.

Dans notre cas, nous sollicitions les experts sur la base de l'analyse AMDE pour modéliser les mécanismes de dégradation des tunnels maçonnés selon le principe suivant (fig. 6-9).

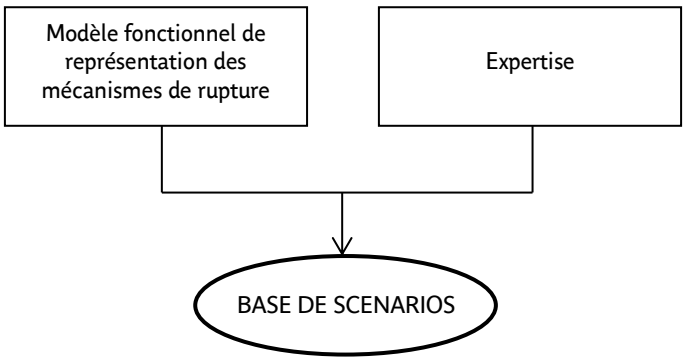



*Figure 6-9 : Démarche pour la modélisation des scénarios (Serre, 2005)*

L'application du modèle fonctionnel de représentation des mécanismes de dégradation des tunnels conduit au graphe causal suivant (fig. 6-10) :

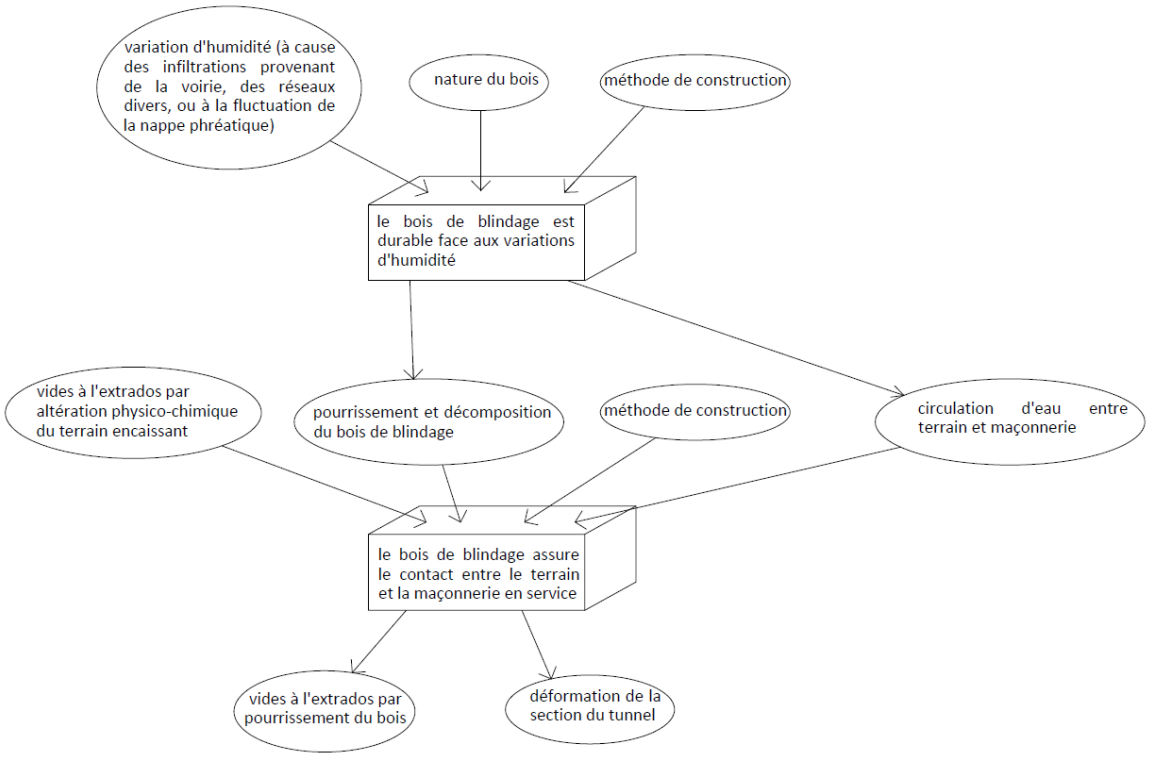



*Figure 6-10 : Scénario de dégradation du tunnel maçonné (extrait)*

Le mécanisme de dégradation des tunnels maçonnés comporte plusieurs séquences de défaillance (Annexe 7). Selon l'extrait de la figure 6-10, dans une première séquence de défaillance, plusieurs phénomènes sont susceptibles de dégrader la performance de la fonction « le bois de blindage est durable face aux variations d'humidité ». Il s'agit des phénomènes « variation d'humidité (à cause des infiltrations provenant de la voirie, des réseaux divers, ou à la fluctuation de la nappe phréatique) », « nature du bois », et/ou « méthode de construction ». La dégradation (ou défaillance) de cette fonction produit comme effets des phénomènes tels que « pourrissement et décomposition du bois de blindage » et/ou « circulation d'eau entre terrain en maçonnerie » qui, avec les phénomènes « vides à l'extrados par altération physico-chimique du terrain encaissant », et/ou « méthode de construction », peuvent dégrader la fonction « le bois de blindage assure le contact entre le terrain en la maçonnerie en service ».

La perte de performance de cette dernière fonction conduit au développement des phénomènes « vides à l'extrados par pourrissement du bois » et/ou « déformation de la section du tunnel » ; phénomènes qui sont, à leur temps, cause de nouvelles pertes de performance. De cette façon, la concaténation des pertes de performance des différentes fonctions conduisent à la dégradation des tunnels maçonnés.

Par l'analyse des processus physiques s'opérant dans les ouvrages et à chaque niveau de défaillance, nous avons recensé les fonctions de conception des composants qui vont se dégrader, et les phénomènes conduisant et résultant de ces modes de défaillance. Nous disposons donc de toutes les informations pour construire, à partir des résultats de l'AMDE et l'apport de l'expertise, le graphe causal correspondant à la dégradation des tunnels maçonnés (Annexe 7).

## 6.4 *Modélisation des mécanismes déclenchant les actions de maintenance sous forme de graphes causaux*

Nous avons vu que la méthode des graphes causaux permet, suite à l'application de l'AMDE, de représenter les séquences de défaillances dans une structure (Millet *et al.*, 1999). Nous adaptons cette représentation pour bâtir les différents scénarios déclenchant les actions de maintenance.

Nous pouvons dire, au regard des concepts de la Sûreté de Fonctionnement, que le but des actions de maintenance est d'assurer que les ouvrages remplissent leurs fonctions avec un niveau suffisant de sécurité, de fiabilité, de disponibilité et de durabilité pendant toute la durée de service imposée (Paterna et *al.*, 2013). Ces fonctions, identifiées lors de l'application de l'AF, seront la base pour construire les différents scénarios. A partir de ces fonctions, et de façon déductive, on identifie les phénomènes (AMDE) et les différentes séquences de défaillance qui contribuent à la dégradation des performances (graphe causal).

La figure 6-11 illustre le scénario de déclenchement du « ***collage*** ». Cette action de maintenance est appliquée lorsque la fonction « assurer le contact entre la maçonnerie et le terrain encaissant » est dégradée ou défaillante. Cette fonction sera donc la base du graphe causal à partir duquel on précise les phénomènes susceptibles de la dégrader. Ces résultats nous permettent d'identifier les phénomènes et séquences de défaillance déclenchant l'action de maintenance « ***collage*** ».

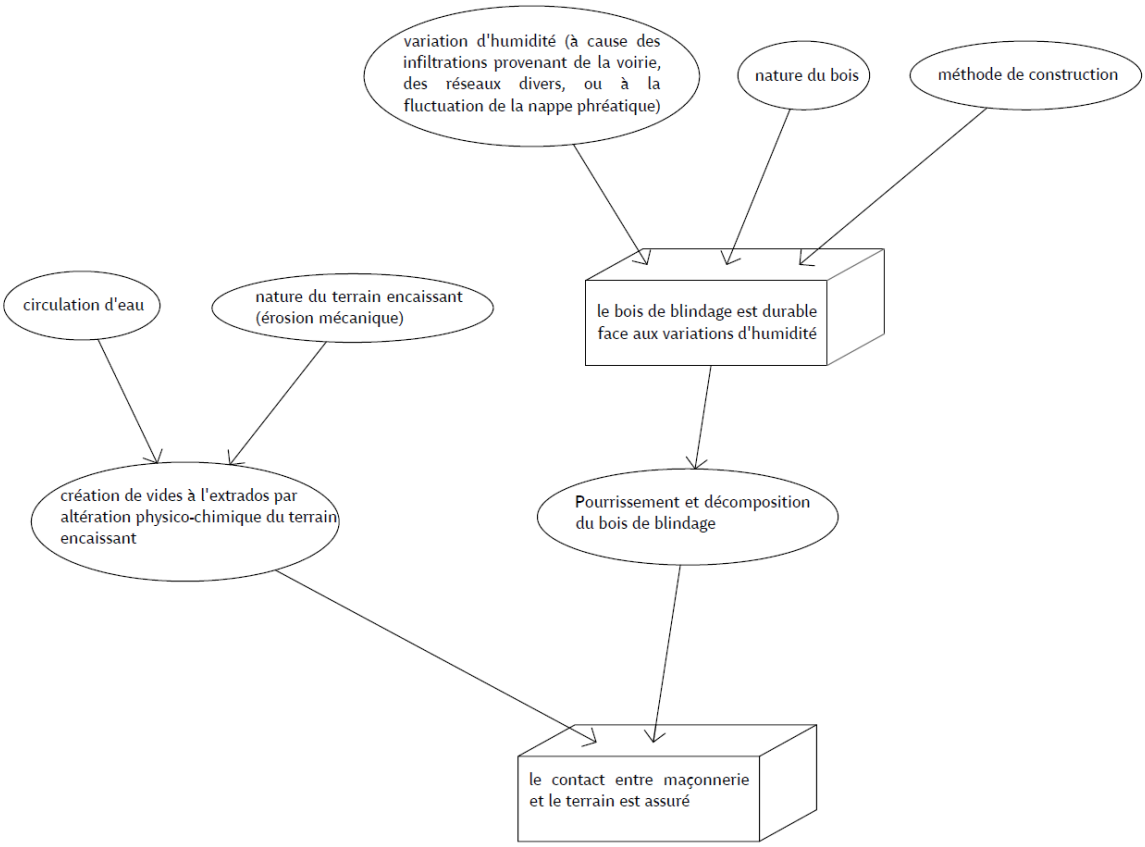



*Figure 6-11 : Graphe causal relatif au mécanisme de déclenchement du collage*

Les graphes causaux offrent plusieurs applications possibles, comme par exemple l'élaboration d'indicateurs de performance (Serre, 2005). Nous adaptons sa méthodologie pour identifier les paramètres à prendre en compte pour établir une hiérarchisation des ouvrages à traiter en termes de performance (cet aspect sera abordé dans la suite du document : cf. § 7.1).

Dans le but de développer un outil d'aide à la décision opérationnel et simple, nous devons adapter les résultats issus des graphes causaux à l'information disponible aux gestionnaires de la RATP. Dans ces circonstances, certains phénomènes exigent une information qui n'est pas toujours disponible, ou l'obtention de données est trop coûteuse par rapport au bénéfice qu'elles pourraient apporter. Par exemple (fig. 6-11), il n'est pas possible de connaître le type de bois utilisé lors de la construction des tunnels plus d'un siècle avant (en outre, une campagne de reconnaissance serait presque aussi coûteuse que les travaux de collage). Cette absence d'information rend le phénomène « *nature de bois* » inexploitable en termes de prise de décision. De même, tous les tunnels maçonnés de la RATP ont été construits selon la méthode franco-belge (§ 1.1.3). Ainsi, le phénomène « *méthode de construction* » n'apporte aucune information exploitable pour hiérarchiser un ouvrage par rapport à un autre (tous les ouvrages seraient équivalents au regard de ce point de vue).

On obtient donc un graphe causal simplifié et adapté aux informations disponibles (fig. 6-12).

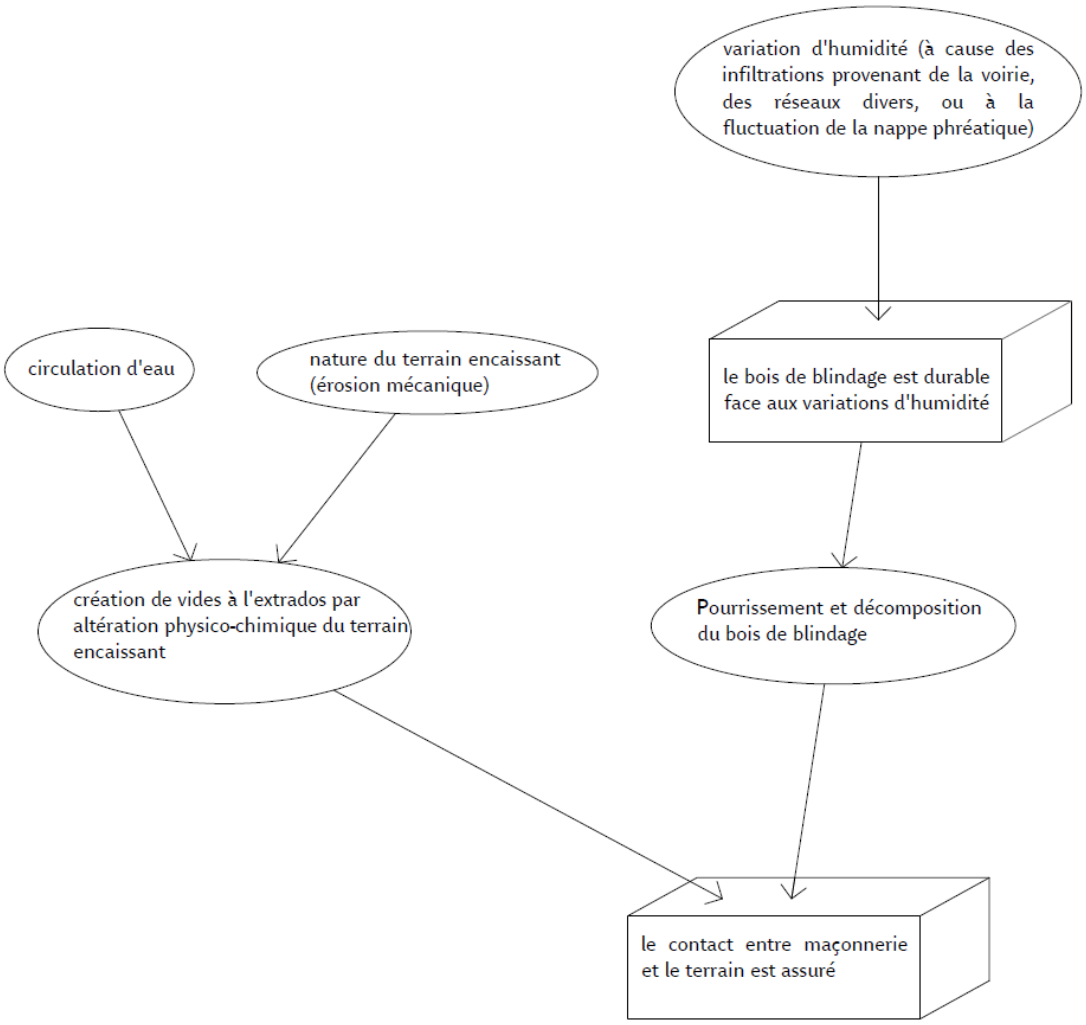



*Figure 6-12 : Graphe causal simplifié relatif au mécanisme de déclenchement du collage*

Ce graphe causal simplifié offre une vision plus claire des phénomènes qui conduisent au déclenchement des opérations de collage (les autres graphes causaux sont représentés en Annexe 7). En outre, les graphes causaux permettent d'identifier et de structurer l'information disponible à partir de laquelle nous allons construire un *critère de* « ***performance*** » (§ 7.1).

Nous avons élaboré une liste des paramètres compilant ces informations. Nous l'avons ensuite présenté aux gestionnaires de la RATP pour qu'ils la complètent, en intégrant leur expertise, afin d'obtenir une liste exhaustive des paramètres à prendre en compte pour élaborer un *critère de* « ***performance*** » (tableau 6-6).

| Critère | Sous-critère | Paramètre |
|---|---|---|
| **Performance** | **Performance à T** | Etat de santé (note MARION)<br>• Fissurations<br>• Infiltrations<br>• Déformation de la section du tunnel<br>• Ecrasement de la voûte au niveau des reins |
| | | Age de l'ouvrage |
| | | Historique d'opérations d'entretien<br>• Collage<br>• Régénération<br>• Réfection d'enduit |
| | **Caractéristiques de l'ouvrage** | Largeur de l'ouvrage |
| | **Cinétique** | Evolution constatée dans la notation MARION |
| | | Fréquence des travaux de réhabilitation |
| | **Agressivité de l'environnement** | Risques géotechniques liés aux terrains :<br>• Agressivité chimique du terrain encaissant<br>• Solubilité du terrain<br>• Comportement mécanique du terrain<br>• Perméabilité du terrain<br>• Fontis |
| | | Risques hydrauliques :<br>• Nappe phréatique<br>• Réseaux divers fuyant<br>• Perméabilité de la voirie |

*Tableau 6-6 : Liste de paramètres considérés pour la construction d'un critère de « **performance** »*

## 6.5 *Synthèse*

Nous avons appliqué les outils de la Sûreté de Fonctionnement pour modéliser les mécanismes de dégradation des tunnels maçonnés de la RATP, tenant compte de leurs environnements et des contextes urbains.

Grâce à l'Analyse Fonctionnelle, nous disposons d'une description précise des tunnels maçonnés, avec un recensement exhaustif de leurs composants (Analyse Structurelle). Les résultats de l'Analyse Fonctionnelle Externe nous permettent, d'une part, de déterminer le besoin principal satisfait par le système et les fonctions contraintes ; d'autre part, de reconnaître les interactions du système avec le milieu extérieur. Ce dernier aspect est essentiel pour identifier les contraintes externes qui interviennent dans la gestion du patrimoine et qui seront modélisées dans la section 7.2 *Construction des critères intervenant dans la gestion patrimoniale de la RATP.*

Grâce à l'Analyse Fonctionnelle Interne, on étudie, d'une part, les interactions entre chaque composant du système et, d'autre part, les interactions entre les composants du système et l'environnement extérieur. Elle aboutit à la liste des fonctions principales du système et des fonctions de conception des composants (synthétisées dans le Tableau d'Analyse Fonctionnelle). Quand ces fonctions sont dégradées ou défaillantes, les actions de maintenance sont déclenchées pour les remettre dans le niveau de performance assurant sécurité et qualité de service des ouvrages.

Les modes de dégradation de ces fonctions sont déterminés grâce à l'Analyse des Modes de Défaillance et leurs Effets, qui a été réalisée à partir des résultats de l'Analyse Fonctionnelle. L'AMDE permet d'obtenir une liste exhaustive des causes qui dégradent les fonctions de conception et de déterminer quels sont les effets qui en découlent.

A partir de ces résultats, et en utilisant une représentation par graphes causaux, nous avons élaboré un modèle fonctionnel des mécanismes de dégradation des tunnels maçonnés sous la forme de scénarios. Afin de corréler cette méthode au fonctionnement réel du système étudié, il a été essentiel d'intégrer la connaissance experte.

Ainsi, en combinant les résultats de l'AMDE et de l'expertise, nous avons construit l'ensemble des scénarios de déclenchement des actions de maintenance sous forme graphes causaux : un scénario global représentant la dégradation des tunnels maçonnés et quatre scénarios de déclenchement de travaux de maintenance (Annexe 7). Ces graphes présentent l'avantage de proposer une vision synthétique des mécanismes de dégradation et de leurs séquences de défaillance.

***Dans le cadre de la gestion du patrimoine, l'application des outils de la Sûreté de Fonctionnement nous a permis d'identifier l'ensemble de facteurs impliqués dans la chaine de dégradation des ouvrages. Les bénéfices sont multiples : d'un côté, on améliore le diagnostic grâce à une meilleure compréhension des causes des défaillances observables lors des inspections visuelles ; d'un autre côté, on obtient une formalisation de l'expertise permettant de capitaliser les connaissances expertes internes de la RATP.***

***En outre, l'application de l'AMDE nous permet de mettre en valeur toutes les informations compilées lors des visites et inspections qui, parfois, sont masquées par la note générale de santé (§ 1.2.3.1) ou, tout simplement, se perdent lors des transmissions d'informations entre les différents intervenants du processus décisionnel. Suite à l'AMDE et à la construction des graphes causaux, l'information disponible issue des inspections visuelles est structurée, ce qui permet d'être mieux exploitée par les gestionnaires dans la phase de prise de décisions.***

***L'application des outils de la Sûreté de Fonctionnement a permis d'obtenir une modélisation du fonctionnement et des mécanismes de dégradation des ouvrages adaptée à l'hétérogénéité des tunnels maçonnés de la RATP, d'identifier les environnements agressifs et de structurer l'information nécessaire pour le développement d'un critère de « performance » (§ 7.1).***

Enfin, grâce à l'application des méthodes de la Sûreté de Fonctionnement, des graphes causaux et à l'intégration de l'expertise, nous avons identifié les paramètres à partir desquels nous allons construire un *critère de « **performance** »* (tableau 6-6). Par la suite, nous présentons l'application de la méthodologie proposée à cet effet (§ 7.1). Le *critère de « **performance** »* obtenu permettra d'évaluer la performance des ouvrages et de synthétiser les différents aspects techniques qui interviennent dans la gestion patrimoniale de la RATP dans un seul critère de décision.

# Chapitre 7. Construction d'une famille cohérente de critères dans le cadre de la gestion patrimoniale de la RATP

La détermination des différents points de vue et la construction d'un ou plusieurs critères constituent un exercice d'explicitation et de formalisation des aspects jugés pertinents pour la décision. Dans la plupart des situations concrètes, les préférences des acteurs impliqués dans un processus de décision ne sont pas rigoureusement définies a priori ni stables. La construction de critères constitue alors une étape clé du processus de décision : aider à clarifier la formation, la structuration et l'argumentation des préférences.

Il s'agit ainsi, pour un décideur, d'un approfondissement de la connaissance du problème de décision. Ceci le conduit à s'interroger sur ce qui compte réellement dans la comparaison des actions et à analyser, un par un, les arguments qui fondent des préférences vis-à-vis des actions du problème. En effet, cette étape d'explicitation des points de vue engendre une mise à plat des préoccupations du décideur et permet de rassembler et de synthétiser la totalité des informations disponibles à partir desquelles la comparaison des ouvrages à traiter sera raisonnée dans notre outil d'aide à la décision.

Ce chapitre propose une procédure destinée à construire une famille cohérente de critères de décision formalisant le processus décisionnel des gestionnaires de la RATP. Dans un premier temps, la section 7.1 aborde la construction d'un *critère de* « ***performance*** » à partir de la modélisation fonctionnelle obtenue dans le chapitre précédent. Afin d'avoir une vision globale de tous les aspects intervenant dans la gestion du patrimoine de la RATP, ce critère de décision est complété par d'autres de nature économique, de qualité de service, d'impact environnemental, etc. Ces critères sont construits à partir de la formalisation de l'expertise dans la section 7.2.

## 7.1 Construction d'un critère de « performance »

La construction d'un *critère de* « ***performance*** » est réalisée à partir de la modélisation fonctionnelle des mécanismes de dégradation des tunnels maçonnés réalisée dans le Chapitre 6. Le tableau 6-6 représente les paramètres sur lesquels nous nous basons pour construire un *critère de* « ***performance*** ». Dans un contexte d'aide à la décision multicritère, ces paramètres, ou éléments primaires, sont représentés par le terme *conséquences* (§ 5.3).

Travailler avec un tel nombre de paramètres entraîne une perte de lisibilité. Comme ils font partie d'une même catégorie (technique), nous visons à les agréger dans une évaluation unique permettant de construire un seul critère. Nous sommes donc confrontes à construire un critère à plusieurs conséquences. Pour ce faire, nous adoptons la démarche proposée par (Azibi, 2003). Cette démarche de construction de critères est fondée sur trois étapes : la définition d'une échelle de préférence (§ 7.1.1), la proposition de règles d'évaluation des paramètres (§ 7.1.2), et l'agrégation des paramètres en un critère de décision (§ 7.1.3).

La figure 7-1 représente cette démarche avec les méthodes multicritère que nous proposons d'utiliser à chaque étape :

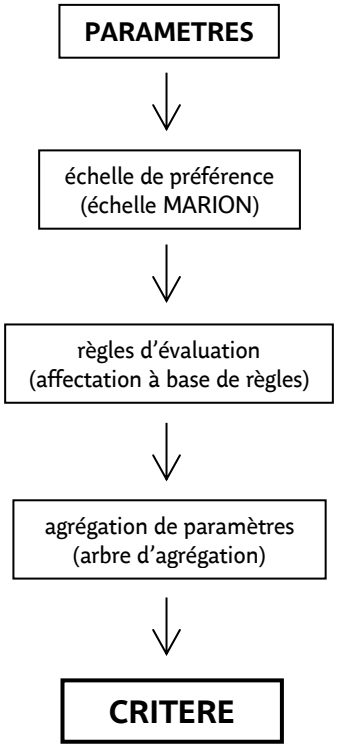



*Figure 7-1 : Démarche proposée pour la construction d'un critère à partir des différents paramètres*

### *7.1.1 Proposition d'une échelle de préférence*

Selon (Roy, 1997) « une échelle de préférence est un ensemble d'éléments, appelés échelons, rangés selon un ordre complet ; chaque échelon est caractérisé soit par un nombre, soit par un énoncé verbal ; il sert à traduire l'évaluation d'une action en prenant en compte des effets et attributs clairement précisés ; relativement à ceux-ci et toutes autres choses égales par ailleurs, le rangement des échelons reflète le sens de variation de la préférence vis-à-vis des situations qu'ils servent à caractériser ».

Plusieurs échelles sont présentées dans la littérature des méthodes multicritère, comme par exemple, (Roberts, 1979). Nous présentons uniquement les échelles de préférence qu'on a considérées comme les plus adaptées à notre problématique, celles précisées par (Roy, 1997) :

- *Seulement ordinale* : l'écart entre deux échelons n'a pas de signification claire en terme d'écarts de préférence. Ces échelles peuvent être verbales (échelons définis par un énoncé verbal) ou numériques (échelons définis par un nombre). Ce type d'échelle est désigné également par *échelle qualitative.*
- *Quantitative* : échelle numérique dont les échelons sont définis par référence à une unité clairement identifiée de façon à donner sens d'une part à l'absence de quantité (échelon 0) et, d'autre part, au rapport entre deux échelons quelconques comme étant égal au rapport des nombres qui les caractérisent, chacun d'eux quelconques comme étant égal au rapport des nombres qui les caractérisent, chacun d'eux pouvant s'interpréter comme l'addition d'un nombre donné (entier ou fractionnaire) d'unités de la quantité considérée.
- *Intermédiaire entre les deux cas précédents* : c'est notamment le cas des échelles d'intervalles où le rapport des nombres qui caractérisent deux échelons peut ne pas être signifiant mais où celui entre les différences des nombres associés à deux couples d'échelons distincts l'est (exemple : évaluation d'une température en degrés Celsius ou Fahrenheit) ; ou encore des échelles à propos desquelles on

peut définir un préordre complet sur l'ensemble des couples d'échelons. On se réfère à ce type intermédiaire en parlant d'échelle numérique non quantitative ou d'échelle discrète (cas d'un nombre fini d'échelons).

Il s'agit donc pour chaque paramètre de retenir l'échelle qui représente au mieux l'information qu'il contient et qui soit la plus compréhensible pour le décideur.

La note MARION peut être considérée comme un cas intermédiaire d'échelle qualitative ordinale. ***Elle est une échelle qualitative à laquelle on associe des valeurs numériques définissant un préordre complet sur l'ensemble des échelons*** : l'échelon 1 représente la situation idéale, où l'intérêt à réaliser des travaux d'entretien est moindre, et le 7 la situation la plus défavorable, où l'intérêt à réaliser des travaux est maximum.

D'autres paramètres, en fonction de leur nature, peuvent nous induire à adopter d'autres échelles. Ce serait le cas, par exemple, du paramètre « *âge de l'ouvrage* », pour lequel une échelle quantitative semblerait la plus adaptée (tableau 6-6).

Cependant, la construction d'un critère, même si ce n'est pas une condition nécessaire, est beaucoup plus aisée quand les paramètres qui y interviennent sont représentés sous la même échelle d'évaluation. Dans ce contexte, nous proposons de prendre comme référence l'échelle MARION pour évaluer tous les paramètres. C'est-à-dire, une échelle de 1 à 7 et maintenir un sens de préférence croissant, dans lequel une note plus élevée représente un intérêt plus grand pour la réalisation des travaux de maintenance (tableau 7-1) :

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Minimum d'intérêt à réaliser des travaux de maintenance | | | | | | Maximum d'intérêt à réaliser des travaux de maintenance |

*Tableau 7-1 : Echelle des scores des paramètres proposée (basée sur l'échelle de notation MARION)*

Cette méthode peut sembler un peu « artificielle », mais elle nous permet d'adopter un raisonnement cohérent avec les préférences et habitudes des gestionnaires de la RATP, ce qui est un des axiomes principaux de l'aide à la décision.

Afin de nous adapter aux caractéristiques des différents paramètres, certains pourront être évalués en utilisant toute la plage de l'échelle (1 à 7), alors que d'autres seront évalués sur une plage plus restreinte. A titre d'exemple, le paramètre « *largeur de l'ouvrage* » ne pourra atteindre au maximum que le score 3 car son rôle dans le mécanisme de déclenchement des travaux de maintenance est limité (cf. Annexe 7). Cette restriction de plages nous permettrait de représenter l'importance relative entre paramètres sans avoir besoin de recourir à l'emploi de coefficients de pondération pour la construction du *critère de* « ***performance*** ». Cet aspect est primordial pour simplifier l'agrégation du critère car, même si les experts perçoivent ces importances relatives, leur affecter des pondérations peut s'avérer une tâche peu évidente.

***Notons que, dans notre cas, les paramètres doivent être évalués sur une échelle qualitative. Le problème de l'évaluation s'inscrit dans une problématique plus générale qui est celle de l'affectation. Il s'agit d'affecter des actions (qui dans notre cas correspondent aux ouvrages concernés par des PGE) à des catégories prédéfinies qui correspondent ici aux échelons de la notation MARION. Dans ces circonstances, la méthode d'affectation par règles du type « si… alors… » s'avère adaptée pour l'évaluation de nos paramètres.***

Nous présentons maintenant les règles d'affectation que nous avons définies avec l'aide des experts, qui nous permettront d'attribuer, sans ambigüité, les évaluations de chaque paramètre.

### *7.1.2 Proposition des règles d'affectation pour l'évaluation des paramètres*

Certains paramètres sont évalués directement selon la notation MARION ; pour eux, aucune règle d'affectation n'est nécessaire (ils sont déjà évalués selon l'échelle d'étude). C'est le cas de ceux qui représentent les désordres structuraux relevés lors des actions de surveillance visuelle : fissurations, infiltrations, etc.

Pour les autres, et afin d'avoir une illustration représentative de note démarche, nous traitons les règles d'affection pour l'évaluation des paramètres :

- « âge de l'ouvrage » ;
- « *historique d'opérations d'entretien* ».

Le reste de règles d'affectation est représenté dans l'Annexe 8.

***Age de l'ouvrage***

Les gestionnaires de la RATP considèrent que les ouvrages le plus anciens doivent être prioritaires dans les programmes de maintenance.

Afin de représenter cette préférence des gestionnaires, nous attribuons la note 1, celle qui représente la condition la moins urgente, aux ouvrages les plus récents (moins de 15 ans). La condition la plus urgente, représentée par la note 7, correspond aux ouvrages les plus anciens, qui ont plus d'un siècle de vie. Nous proposons de ne pas utiliser l'échelon 6 afin de marquer encore plus la priorisation des ouvrages âgés de plus de 100 ans vis-à-vis des autres ouvrages, ce qui est en cohérence avec le critère des experts. Les règles d'affectation des autres d'échelons sont précisées dans le tableau 7-2 :

| **Note** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Age de l'ouvrage (ans) | 0 – 14 | 15 - 34 | 35 - 54 | 55 - 74 | 75 - 100 | | > 100 |

*Tableau 7-2 : Règles d'affectation pour le paramètre « âge de l'ouvrage »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'âge de l'ouvrage est compris entre 0 et 14 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 1

$r_2$ : ***si*** l'âge de l'ouvrage est compris entre 15 et 34 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 2

$r_3$ : ***si*** l'âge de l'ouvrage est compris entre 35 et 54 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 3

$r_4$ : ***si*** l'âge de l'ouvrage est compris entre 55 et 74 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 4

$r_5$ : ***si*** l'âge de l'ouvrage est compris entre 75 et 100 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 5

$r_6$ : ***si*** l'âge de l'ouvrage est supérieure à 100 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 7

Nous rappelons que la période de construction des tunnels maçonnés, selon la méthode franco-belge, est comprise entre les années 1900 et 1960. Pour ces ouvrages, les échelons 1, 2, 3 ne sont pas discriminants en termes de priorisation, tous les ouvrages ayant plus de 54 ans aujourd'hui. Nous considérons cependant convenable de préciser les règles d'affectation de ces notes, afin que notre méthodologie soit facilement extrapolable au reste de types d'ouvrages de la RATP.

Cette proposition de règles nous permet de passer d'une échelle quantitative de l'évaluation du paramètre « *âge de l'ouvrage* » à une échelle en cohérence avec celle de la notation MARION. Il faut remarquer qu'une perte d'information s'est produite en adoptant une échelle moins discriminante (uniquement 7 catégories pour évaluer une amplitude d'âges de plus de 100 ans). Néanmoins, les gestionnaires de la RATP ont considéré comme tolérable cette perte d'information et ont validé cette procédure.

***Historique des opérations d'entretien***
On considère que les opérations d'entretien rendent l'ouvrage à son état à neuf. Néanmoins, cette amélioration ne se matérialise pas nécessairement sur l'actuel système de notation MARION (Rysak, 2013). Par exemple, la régénération d'un tunnel fissuré permet de rétablir les propriétés mécaniques et diminue la porosité de la maçonnerie. Par contre, les fissures restent toujours visibles et la surveillance étant visuelle, la note MARION n'est pas améliorée.
Pour remédier à cet inconvénient, nous considérons qu'une opération d'entretien abaisse à la note 1 (la plus favorable) l'évaluation des paramètres des désordres suivants : « *fissurations* » et « *infiltrations* ».

Afin d'assurer la cohérence d'une préférence croissante dans toutes les évaluations des paramètres (plus la note est élevée, plus il y a de l'intérêt à faire des travaux de réhabilitation), nous considérons que « *l'historique d'opérations d'entretien* » doit aboutir à une note négative ; un ouvrage qui vient d'être réhabilité ne sera logiquement pas prioritaire dans le cadre d'une prochaine programmation de travaux.

Ainsi, nous attribuons la note -12 aux ouvrages qui ont été récemment réhabilités (entre 0 et 14 ans depuis la dernière réhabilitation). Pour la situation la plus défavorable, les gestionnaires considèrent que la durée de vie d'un ouvrage régénéré est de 70 ans (cette hypothèse est basée sur la durée d'amortissement) ; la note 0 est par conséquent attribuée aux ouvrages qui ont été régénérés il y a plus de 70 ans ou qui n'ont jamais été régénérés. Nous conservons toujours une échelle divisée en 7 échelons avec la distribution de notes définie selon le tableau 7-3.

| Note | -12 | -10 | -8 | -6 | -4 | -2 | 0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Historique d'opérations de régénération ou de collage (ans) | 0 – 14 | 15 - 29 | 30 - 39 | 40 - 49 | 50 - 59 | 60 - 69 | ≥ 70 |

*Tableau 7-3 : Règles d'affectation pour le paramètre « historique d'opérations d'entretien »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération d'entretien entre 0 et 14 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -12

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération d'entretien entre 15 et 29 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -10

$r_3$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération d'entretien entre 30 et 39 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -8

$r_4$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération d'entretien entre 40 et 49 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -6

$r_5$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération d'entretien entre 50 et 59 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -4

$r_6$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération d'entretien entre 60 et 69 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -2

$r_7$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération d'entretien il y a 70 ans ou plus, ***et si*** l'ouvrage n'a jamais été régénéré ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0.

***Notion de veto***
Un autre avantage du mécanisme d'affectation par règles est la possibilité d'introduire facilement des seuils de veto (Roy, 1985). Un seuil de veto permet d'affecter directement une action dans une catégorie précise dès qu'une condition définie par les décideurs est accomplie. Tel serait le cas du paramètre « *infiltrations* » pour lequel nous proposons d'affecter en catégorie 7 une infiltration affectant les rails de courant (cf. Annexe 8).

Une fois une liste exhaustive des règles d'affectation de tous les paramètres définie, l'étape suivante dans la construction du *critère* « ***performance*** » consiste à agréger les évaluations de tous les paramètres dans une seule note synthétique.

### *7.1.3 Agrégation du critère « performance »*

Grâce à la méthode de l'affectation par règles, nous obtenons une évaluation ponctuelle de chaque paramètre représentée sur une échelle qualitative associée à des valeurs numériques (échelle de référence MARION).

D'une part, le caractère qualitatif des évaluations peut nous induire à appliquer à nouveau dans cette étape une méthode d'agrégation par règles. D'autre part, le caractère numérique de l'échelle d'évaluation des paramètres nous conduit à préférer un modèle d'agrégation analytique (§ 5.3.1). Nous rappelons que la plupart des paramètres considérés pour construire le *critère* « ***performance*** » ont été identifiés grâce à l'application des outils de la Sûreté de

Fonctionnement (Chapitre 6). ***En effet, les paramètres représentent les phénomènes qui déclenchent les actions de maintenance, dont les interactions ont été modélisées lors de la modélisation des mécanismes de dégradation (§ 6.4). Ce parallélisme entre paramètres et phénomènes doit être respecté. L'agrégation de paramètres doit ainsi suivre l'ordre établi par les interactions des phénomènes, afin d'obtenir une évaluation de la performance la plus proche possible de la réalité.***

Dans ce contexte, nous optons pour adopter un mécanisme d'agrégation intermédiaire, permettant d'agréger analytiquement les évaluations des paramètres, mais en respectant l'ordre établi par nos mécanismes de défaillance. Pour ce faire, la méthode de l'arbre d'agrégation élaborée par (Labbouz, 2008) (Annexe 2) s'avère tout à fait adaptée à notre problématique (fig. 7-2).

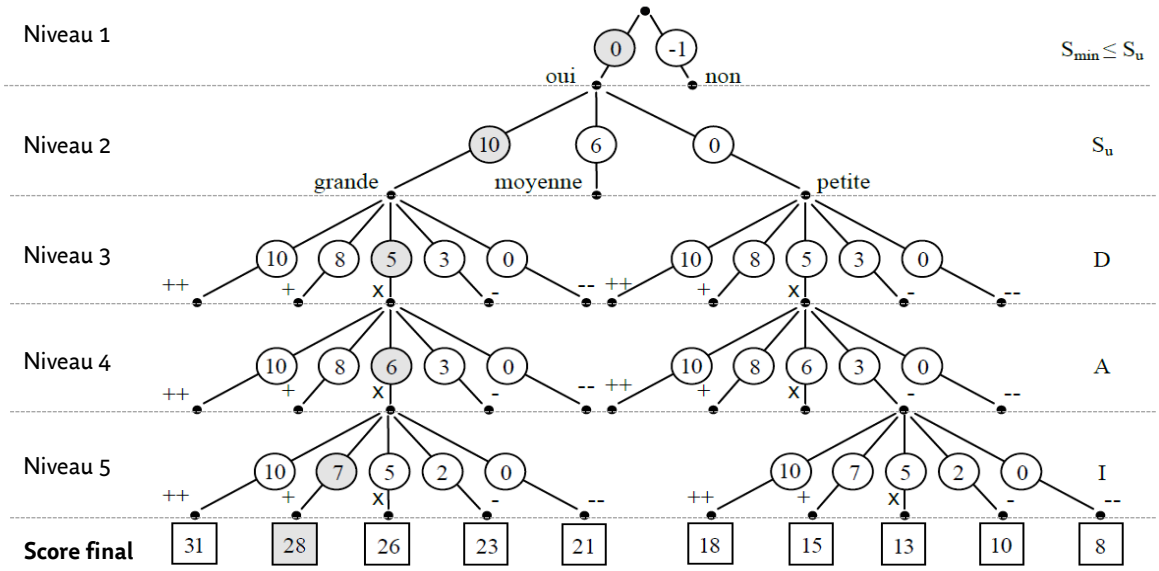



*Figure 7-2 : Arbre d'agrégation pour le critère « la position de l'atelier-garage » (Labbouz, 2008)*

Nous proposons une construction de l'arbre d'agrégation pour le *critère* « ***performance*** » en fonction de deux axes :

- La cohérence avec les mécanismes de déclenchement des actions de maintenance que nous avons identifiées à partir des mécanismes de dégradation des tunnels maçonnés (§ 6.4).
- L'adaptation aux préférences des gestionnaires de la RATP pour formaliser leur expertise de la façon la plus transparente possible.

Nous proposons d'illustrer cette procédure par un extrait de son application pour le mécanisme de déclenchement des travaux de régénération pour ce qui concerne les piédroits (fig. 7-3).

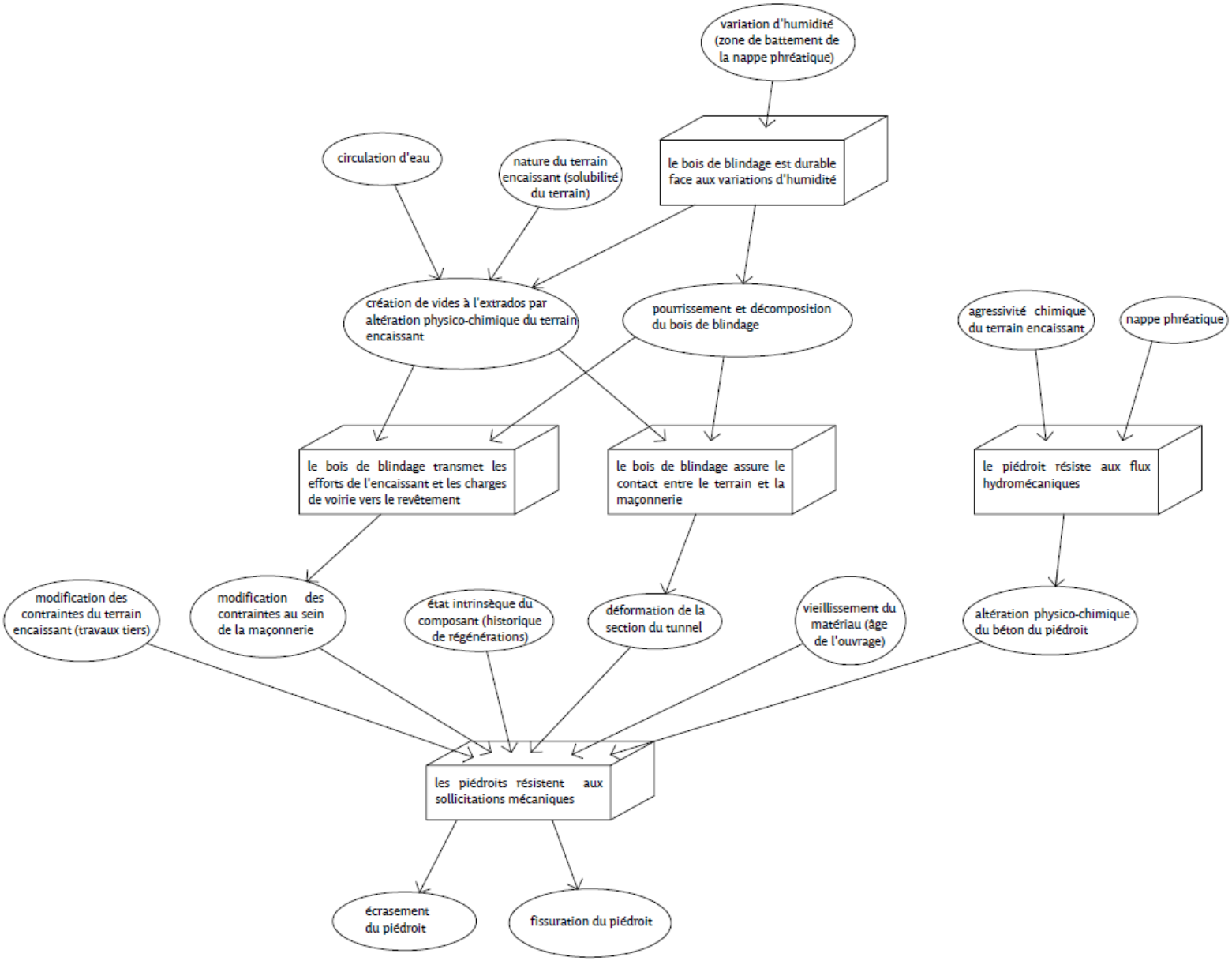



*Figure 7-3 : Mécanisme de déclenchement des travaux de régénération (piédroit)*

Le tableau 7-4 montre l'association entre les phénomènes du mécanisme représenté par la figure 7-3 et les paramètres proposés pour construire le *critère de* « ***performance*** » :

| Phénomènes | Paramètres |
|---|---|
| Variation d'humidité (zone de battement de la nappe phréatique) | Nappe phréatique |
| Circulation d'eau | Nappe phréatique |
| Nature du terrain (solubilité du terrain) | Solubilité du terrain |
| Vides à l'extrados par altération physico-chimique du terrain encaissant | (Evalué indirectement à partir de la combinaison entre les paramètres *nappe phréatique* et *solubilité du terrain*) |
| Pourrissement et décomposition du bois de blindage | (Evalué indirectement à partir de *nappe phréatique*) |
| Agressivité chimique du terrain encaissant | Agressivité chimique du terrain encaissant |
| Nappe phréatique | Nappe phréatique |
| Modification des contraintes du terrain encaissant (travaux tiers) | Travaux externes (ce paramètre est considéré dans le critère « *opportunité de travaux* ») |
| Modification des contraintes au sein de la maçonnerie | (Evalué indirectement à partir de l'*écrasement de la voûte au niveau des reins*) |
| Etat intrinsèque du composant (historique des réhabilitations) | Historique d'opérations d'entretien : collage et régénération |
| Déformation de la section du tunnel | Déformation de la section du tunnel (note MARION) |
| Vieillissement du matériau (âge de l'ouvrage) | Age de l'ouvrage |
| Altération physico-chimique du béton du piédroit | (Evalué indirectement à partir de la combinaison entre les paramètres *nappe phréatique* et *agressivité chimique du terrain encaissant*) |
| Fissuration du piédroit | Fissurations (note MARION) |
| Déplacement de divergence des piédroits | Déformation de la section du tunnel (note MARION) |

*Tableau 7-4 : Association entre phénomènes et paramètres pour la construction du critère « **performance** »*

A la base de ce mécanisme de déclenchement (fig. 7-3) se situent les désordres qui sont repérés lors des inspections visuelles. Les causes originaires de ces désordres peuvent être identifiées en remontant vers le haut du mécanisme. Afin de respecter cet ordre d'effet – cause, nous proposons de partir du bas vers le haut du mécanisme de déclenchement pour construire notre arbre d'agrégation (fig. 7-4). En outre, nous suggérons de le diviser en trois grands niveaux pour mieux nous adapter à la procédure de raisonnement des gestionnaires RATP et faciliter la compréhension :

- Niveau 1 : évaluation de l'état intrinsèque de l'ouvrage ;
- Niveau 2 : historique d'opérations d'entretien ;
- Niveau 3 : évaluation des risques.

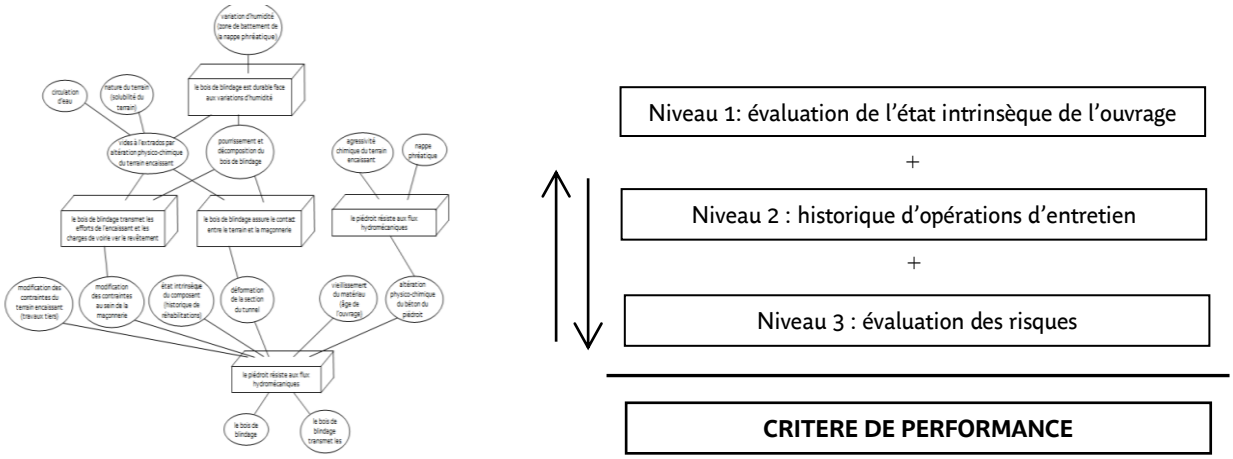



*Figure 7-4 : Sens de corrélation entre le mécanisme de déclenchement et la construction de l'arbre d'agrégation du critère « **performance** »*

Dans le but d'illustrer notre méthodologie de construction de l'arbre d'agrégation pour le *critère de* « ***performance*** », nous n'allons volontairement traiter que les piédroits dans le mécanisme de déclenchement des travaux de régénération (fig. 7-3). L'arbre d'agrégation complet, comprenant la totalité de mécanismes de déclenchement et l'expertise des gestionnaires, est présenté en Annexe 7.

***Niveau 1 : évaluation de l'état intrinsèque de l'ouvrage***

**Fissurations**

| Non | Note MARION du désordre | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** |

**Les fissurations présentent des infiltrations ?**

| Non | Infiltration inactive | Infiltration active | | Infiltration affectant le rail de roulement | | Infiltration affectant les quais recevant les voyageurs | Infiltration affectant la signalisation ou le rail de courant |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7 (veto)** |

**Déformation de la section du tunnel**

| Non | Note MARION du désordre | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** |

**Ecrasement de la voûte au niveau des reins**

| Non | Note MARION du désordre | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** |

**Age de l'ouvrage (ans)**

| 0 – 14 | 15 - 34 | 35 - 54 | 55 - 74 | 75 - 100 | | > 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** |

***Niveau 2 : historique des opérations d'entretien***

**Régénération de la maçonnerie (ans)**

| 0 – 14 | 15 - 29 | 30 - 39 | 40 - 49 | 50 - 59 | 60 - 69 | ≥ 70 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **-12** | **-10** | **-8** | **-6** | **-4** | **-2** | **0** |

**Collage (ans)**

| 0 – 14 | 15 - 29 | 30 - 39 | 40 - 49 | 50 - 59 | 60 - 69 | ≥ 70 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| -12 | -10 | -8 | -6 | **-4** | -2 | 0 |

**Réfection d'enduits (ans)**

| 0 – 5 | 6 - 11 | 12 - 17 | 18 - 23 | 24 - 29 | 30 - 35 | > 35 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **-6** | **-5** | **-4** | **-3** | **-2** | **-1** | **0** |

***Niveau 3 : évaluation de risques***

**Altération physico-chimique de la maçonnerie**

| Présence d'eau : nappe phréatique | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Non | Oui : zone d'influence de la Seine | | Oui : hors zone d'influence de la Seine | |
| Agressivité chimique du terrain encaissant | | | | |
| | Zone présentant des teneurs en sulfate inférieures à 600 mg/l | Zone présentant des teneurs en sulfate supérieures à 600 mg/l | Zone présentant des teneurs en sulfate inférieures à 600 mg/l | Zone présentant des teneurs en sulfate supérieures à 600 mg/l |
| **0** | **0** | **3** | **6** | **7** |

**Vides à l'extrados par altération physico-chimique du terrain encaissant**

| Solubilité du terrain : présence de gypse | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Non | Calcaire de Saint-Ouen ou Marnes et Caillasses | | Calcaire de Saint-Ouen et Marnes et Caillasses | |
| Présence d'eau : nappe phréatique | | | | |
| | Non | Oui | Non | Oui |
| **0** | **2** | **3** | **6** | **7** |

**Pourrissement du bois de blindage**

| Ouvrage complètement immergé dans la nappe phréatique | Ouvrage sans contact avec la nappe phréatique | Ouvrage dans la zone de battement de la nappe phréatique |
|---|---|---|
| **1** | **3** | **7** |

Enfin, l'évaluation du *critère* « ***performance*** » se fait par l'addition des notes des différents étages de l'arbre d'agrégation. Nous proposons une illustration complète de cette démarche dans l'Annexe 9 avec un exemple d'évaluation pour l'action « *Gare de l'Est, tunnel TU030, régénération de la maçonnerie* ».

***Dans le contexte de la gestion patrimoniale, la performance se définit comme « l'aptitude d'une structure à remplir les fonctions pour lesquelles elle a été conçue » (Serre, 2005). Selon cette définition, une évaluation élevée de la performance nous induit à penser que l'aptitude de la structure à remplir ses fonctions de conception est élevée et il n'y aurait donc pas besoin de réaliser des travaux de maintenance. Néanmoins, dans le contexte de notre recherche, nous avons construit notre critère de « performance » d'une manière telle qu'une valeur élevée de son évaluation représente un intérêt plus grand pour réaliser des travaux de maintenance. Ce raisonnement peut s'avérer, dans un premier temps, « contradictoire » avec la définition générale de la performance ; mais dans notre cas, il nous permet de respecter le sens de préférence défini par la notation MARION, tout en étant cohérents avec le raisonnement des gestionnaires de la RATP.***

### *7.1.4 Synthèse*

On peut considérer que la note MARION n'est qu'un des aspects faisant partie de l'évaluation de la performance des ouvrages, car elle représente uniquement l'évaluation des désordres relevés grâce aux actions de surveillance visuelle. Afin d'obtenir une évaluation plus complète et représentative de la performance, nous proposons de compléter la note MARION avec une évaluation de l'agressivité de l'environnement des ouvrages et des risques qui lui sont associés.

L'application des outils de la Sûreté de Fonctionnement et l'avis des experts nous ont permis d'identifier l'information à prendre en compte à cet effet. Cette information est jusque-là dispersée dans différentes bases de données autres que MARION et la façon dont elle intervient dans le processus décisionnel n'est pas formalisée.

Nous avons proposé une liste de paramètres représentant chaque aspect de cette information, à partir desquels nous visons à obtenir une évaluation unique de la performance des ouvrages. Ces paramètres sont de différentes natures (qualitative ou quantitative) et mesurés, a priori, sur des échelles hétérogènes.

Nous avons cherché à construire un *critère de* « ***performance*** » à partir de l'agrégation de paramètres hétérogènes, avec une double exigence : que cette agrégation ne produise ni perte d'information, ni de complexité excessive dans notre procédure. Pour ce faire, nous avons proposé un modèle de construction d'un critère en trois étapes (fig. 7-1) :

- La *définition d'une échelle d'évaluation*. Nous avons proposé une même échelle de référence pour tous les paramètres, basée sur le principe de la notation MARION. C'est-à-dire, une échelle de 1 à 7, où une note plus élevée représente un intérêt plus grand pour réaliser des travaux de maintenance. De cette façon, nous adoptons un raisonnement cohérent avec les préférences et habitudes des gestionnaires de la RATP.
- *L'évaluation des paramètres* par règles d'affectation (Azibi, 2003). Nous avons proposé une liste de règles simples du type « ***si… alors…*** ». Cela nous permet d'attribuer, sans ambigüité, les évaluations de chaque paramètre selon l'échelle de notation MARION définie dans l'étape précédente, et de formaliser le raisonnement des experts dans un langage simple et proche de leur raisonnement.
- *L'agrégation des paramètres* par un mécanisme d'agrégation analytique. Nous avons élaboré un arbre d'agrégation selon la méthode proposée par (Labbouz, 2008) permettant de structurer l'information et de réaliser une agrégation en cohérence avec les séquences des phénomènes qui déclenchent les travaux de maintenance.

Nous avons obtenu un *critère de* « ***performance*** », dont l'évaluation est liée à l'imprécision des informations prises en compte (note MARION) et à l'incertitude produite par un manque d'informations (qu'on ne peut pas obtenir ou qui ne sont pas toujours disponibles comme les résultats de carottages).

Dans ces circonstances, il a été nécessaire d'adopter des simplifications qui font que ce *critère de* « ***performance*** » ne soit pas une modélisation 100 % fidèle à la réalité. Aussi minutieuse qu'ait été notre procédure, les évaluations qu'on obtient ne peuvent donc pas être regardées comme indiscutables. Nous sommes conscients de cette limite dans la construction de notre *critère de* « ***performance*** », et estimons qu'il est à ce stade plus convenable de le considérer comme un *pseudo-critère* (§ 5.4).

Cette condition de *pseudo-critère de* « ***performance*** » est essentielle pour définir les méthodes multicritère à utiliser pour le développement de notre outil d'aide à la décision (Chapitre 8).

***Dans le cadre de la gestion patrimoniale, le pseudo-critère de « performance » nous permet d'établir, à ce moment, une première hiérarchisation des ouvrages à traiter en fonction d'une évaluation de la performance des ouvrages et des risques qui leur sont associés. Cependant, cette hiérarchisation n'est qu'une hiérarchisation partielle, car elle n'est réalisée qu'en fonction des aspects techniques.***

***Dans ce contexte, afin d'obtenir une vision globale de la gestion patrimoniale de la RATP, nous dévons construire d'autres critères de différentes natures qui nous permettront de représenter tous les aspects qui ne sont pas pris en compte par le pseudo-critère de « performance ». Cela fera l'objet de la section 7.2.***

## 7.2 Construction des critères intervenant dans la gestion patrimoniale de la RATP

Dans cette section la construction des critères de décision est réalisée à partir d'avis d'experts, dont aucune formalisation a priori n'existe. Nous présentons ensuite chaque critère de manière descriptive et énumérons les axes de signification à prendre en compte pour leur modélisation. Enfin, nous vérifions la cohésion de la famille de critères obtenue par l'application des axiomes d'exhaustivité, de cohésion et de non redondance.

Dans § 7.1, nous avons construit un *pseudo-critère de* « ***performance*** » grâce à l'application des méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement, l'intégration de l'expertise, et la combinaison d'une méthode d'affectation à base de règles (Azibi, 2003) et de l'arbre d'agrégation (Labbouz, 2008). L'obtention de ce critère nous a permis d'obtenir une évaluation plus exhaustive de la performance des ouvrages que celle de la note MARION.

Si nous nous arrêtions là, notre méthodologie ne serait basée que sur des critères techniques de performance. Dans le contexte d'un patrimoine d'infrastructures en service, l'analyse serait incomplète, car elle ne représenterait pas la globalité des points de vue et des contraintes intervenant dans la gestion du patrimoine.

Par exemple, l'un des objectifs d'une gestion durable des infrastructures est la minimisation des conséquences, qu'elles soient humaines, environnementales, économiques ou causées par la défaillance non attendue d'un ouvrage faisant partie d'un réseau de transports en service. Ces conséquences des défaillances peuvent dépasser largement le périmètre immédiat de l'infrastructure de transport, par exemple en rendant ces infrastructures indisponibles : l'impact économique et social peut alors être très important. De même, les infrastructures peuvent avoir un degré élevé d'interdépendance, la défaillance d'un ouvrage pouvant impacter jusqu'au

fonctionnement d'une ligne de transport et même avoir des répercussions sur la globalité du réseau de la RATP. Dans ces circonstances, pour réaliser une gestion du patrimoine efficace, le *critère de* « ***performance*** » doit être complété par d'autres modélisant les aspects économique, de qualité de service, d'impact environnemental, d'utilité sociétale du patrimoine, etc. Ces différents aspects doivent être clairement définis et traduits en critères.

### *7.2.1 Construction de critères de décision par formalisation de l'expertise*

Dans la section précédente nous avons construit un critère dont l'axe de signification était bien défini : la performance. Ce critère est sous-divisé en paramètres, dont les relations ont été définies à partir d'un modèle fonctionnel des mécanismes de dégradation (Annexe 7). Dans ces circonstances, la construction d'un tel critère a été fondée sur une base bien solide (§ 7.1).

***Dans cette section, nous sommes confrontés également à la construction de critères***, mais le problème réside maintenant à les construire ***à partir de raisonnements experts qui, a priori, ne sont pas formalisés***. Les axes de signification intervenant dans le processus décisionnel ne sont pas clairement définis comme dans le cas précédent et, dans ces circonstances, l'interaction avec les décideurs est essentielle, car leur choix dépend fortement de la nature du problème considéré.

Lors de leur construction, nous visons avant tout à faire en sorte que les acteurs du processus de décision reconnaissent le bien-fondé des comparaisons entre actions qui découlent de ce modèle de critères. Ceci implique un certain nombre de conséquences importantes (Roy et Bouyssou, 1993) :

- Les axes de signification autour desquels sont construits les critères doivent être compris et admis par tous les intervenants du processus de décision. Ces axes de signification devront être suffisamment familiers aux décideurs pour que ceux-ci voient leurs raisonnements reflétés et acceptent de prendre des décisions sur cette base. Pouvoir associer à un axe de signification un critère s'exprimant dans une unité physique claire présente de nombreux avantages à cet égard ;
- Le procédé permettant de définir l'évaluation de chaque action sur le critère doit être compris et admis par tous les acteurs du processus de décision. La recherche d'un procédé simple et transparent doit donc être une préoccupation importante au moment de construire les critères. De plus, il convient d'éviter, autant que possible, d'inclure dans la définition des critères des éléments fortement liés à un système de valeurs particulier, éléments qui pourraient inciter certains acteurs à mettre en doute la validité des comparaisons effectuées sur la base du critère ainsi construit ;
- Le choix d'un critère doit se faire en prenant en compte la qualité des données utilisées pour parvenir à évaluer les diverses actions sur le critère. Lorsque celles-ci sont entachées d'imprécision, d'incertitude et/ou d'indétermination, la façon de construire le critère ne doit pas conduire à faire « dire » à ces données plus que ce qu'elles contiennent.

Il est bien difficile de présenter une méthodologie précise conduisant à choisir les axes de signification pertinents et construire un ou plusieurs critères sur chacun de ces axes. On verra dans la suite du document que ce choix est conditionné par certaines exigences techniques sur la famille de critères (§ 7.2.3).

***Nous proposons de construire notre famille cohérente de critères formalisant l'expertise des gestionnaires RATP en décomposant leurs raisonnements de manière hiérarchique***. De cette façon, les points de vue principaux sont représentés par des critères, eux-mêmes décomposés en

sous-critères et paramètres, tenant compte des différentes dimensions d'un même critère (Keeney, 1988) (fig. 7-5).

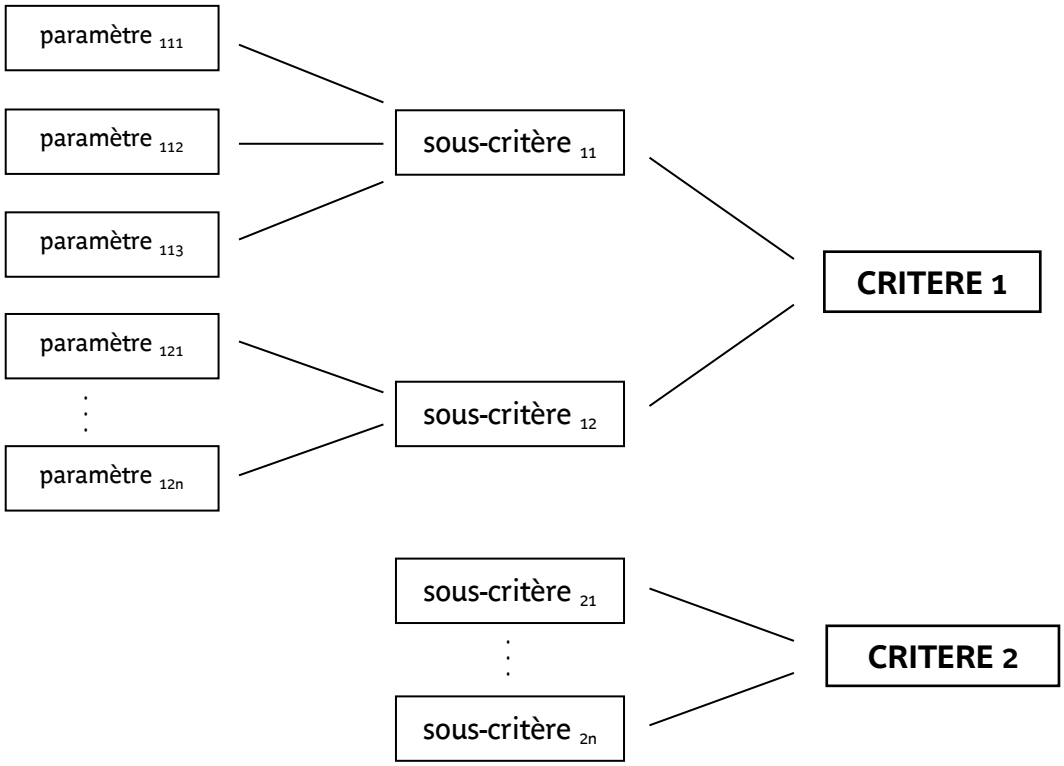



*Figure 7-5 : Décomposition hiérarchique de l'expertise en critères, sous-critères et paramètres*

***Dans ce cas, nous serons à nouveau confrontés à un problème d'agrégation de paramètres pour construire nos critères. Il importe de garder à l'esprit, lors la construction de critères, que cette décomposition hiérarchique devra concerner un ensemble de sous-critères et paramètres relativement restreint afin de garder une certaine simplicité au modèle permettant d'être interprété et discuté facilement, ce qui facilitera l'acceptation de la méthode.***

### *7.2.2 Construction d'une famille cohérente de critères dans le cadre de la gestion patrimoniale de la RATP*

La définition des critères composant une famille cohérente doit être propre à chaque problématique d'aide à la décision. Cette tâche est réalisée en étroite collaboration avec les gestionnaires de la RATP. De cette façon, ils peuvent, dès le début, s'approprier la méthodologie que l'on développe à leur intention.

Selon les indications précédentes, la clarté et la facilité de compréhension sont des qualités essentielles dans l'aide à la décision. Dans ces circonstances, nous visons à réduire autant que possible la décomposition des critères en sous-critères, sans mettre en question leur représentativité. Nous devons également nous adapter à l'information dont on dispose. Evidemment, il n'y a pas de sens à proposer des critères pour lesquels on ne dispose pas de données ; cela complexifierait notre méthodologie sans apporter un bénéfice clair dans notre outil d'aide à la décision.
Dans la suite du document, nous présentons chaque critère de manière descriptive et énumérons les axes de signification à prendre en compte dans leur modélisation. Une description détaillée des règles d'évaluation et de la méthode d'agrégation est disponible en Annexe 8.

#### *7.2.2.1 Critère « impact de la défaillance »*

Ce critère vise à mesurer, pour chaque ouvrage concerné par une proposition de gros entretien (PGE), l'impact occasionné par une éventuelle défaillance. Les gestionnaires de la RATP considèrent que les ouvrages présentant un impact majeur en cas de défaillance doivent être prioritaires dans la programmation de travaux.

Les conséquences des défaillances des infrastructures de transport peuvent être humaines, environnementales ou économiques. Elles peuvent dépasser largement le périmètre immédiat de l'ouvrage du fait, par exemple, de l'indisponibilité du réseau de transports dont l'impact économique et social peut être conséquent. Même s'il y a eu différentes études pour mesurer ces impacts (Llanos, 1992), dans notre cas il s'avère trop difficile de les formaliser sous la forme de critère à cause de l'hétérogénéité de l'information nécessaire pour le construire. On dispose éventuellement de ce type de données pour des cas ponctuels, mais l'obtention à l'échelle globale du réseau n'est pas abordable. Dans ces circonstances, des simplifications s'avèrent nécessaires.

Dans le but d'obtenir une évaluation simple mais suffisamment représentative de cet axe de signification, nous proposons une décomposition du critère « *impact de la défaillance* » dans les sous-critères suivants :

***Impact sur l'exploitation***

Ce sous-critère évalue l'importance stratégique de chaque ouvrage au sein du patrimoine. L'*impact sur l'exploitation* est décomposé dans les paramètres suivants :

- **Défaillance affectant l'exploitation.** L'impact d'une défaillance peut varier en fonction de l'endroit où elle se produit. Ce paramètre propose une évaluation qualitative ordinale en fonction de l'impact produit sur l'exploitation.
- **Fréquentation.** Cet aspect nous permet de considérer l'importance de l'ouvrage en termes de trafic de voyageurs. Une évaluation est attribuée en fonction de la ligne à laquelle appartient l'ouvrage.

  Pour une analyse plus fine, nous pourrions prendre en compte le trafic de voyageurs supporté par chaque interstation. Logiquement, les interstations proches des extrémités des lignes supportent moins de trafic que celles qui sont dans la partie centrale de la ligne. Mais nous considérons que cette importance relative des interstations en fonction de leur emplacement est déjà suffisamment représentée dans le paramètre « *périmètre L2 – L6* ». On considère donc que cette évaluation du trafic à l'échelle de l'interstation n'est pas pertinente, car elle donnerait lieu à une redondance entre nos paramètres (une même information serait prise en compte deux fois).
- **Correspondance.** La défaillance d'un ouvrage de correspondance peut provoquer des répercussions sur le fonctionnement de plusieurs lignes et même à l'échelle du réseau. Ce paramètre nous permet d'évaluer l'impact de la défaillance d'un ouvrage en fonction des correspondances avec les différentes lignes de métro, RER et autres moyens de transport (grandes lignes SNCF, aéroports de Paris…)
- **Périmètre L2 – L6.** Les lignes 2 et 6 du métro forment un périmètre à l'intérieur duquel la densité du maillage du réseau de la RATP permet de trouver facilement un chemin alternatif par l'emprunt d'autres lignes dont les correspondances sont assez proches entre elles. Ce n'est plus le cas des ouvrages qui s'y trouvent à l'extérieur et lorsque le service y est interrompu, la gêne occasionnée aux voyageurs est alors plus importante. Lorsque le service est interrompu sur un territoire situé à l'extérieur de ce périmètre, la RATP doit systématiquement mettre en place des services de substitution appropriés

pendant la durée de l'interruption. A l'intérieur de ce périmètre, le service de substitution est mis en place en fonction des besoins (STIF, 2012). Notre paramètre prend en compte cette différence, en priorisant les ouvrages qui sont à l'extérieur du périmètre formé par les lignes 2 et 6 à ceux situés à l'intérieur.

***Image RATP***

Certaines lignes symbolisent le développement technique de la RATP, comme c'est le cas pour les lignes automatiques. Elles ont un effet « vitrine » qu'il est important de conserver. Ce critère permet d'augmenter la priorité de ces lignes « vitrine » : Ligne 1, Ligne 4 et Ligne 14.

***Impacts externes***

Les impacts des défaillances peuvent dépasser largement le périmètre immédiat de l'infrastructure. Ces impacts externes sont difficiles à mesurer, à cause des multiples interactions existant entre un réseau de transport et un environnement urbain très dense, comme c'est le cas de la RATP et de la région parisienne.

Des paramètres plus fins pourraient être pris en compte : l'intérêt touristique, l'importance socio-économique de l'ouvrage, la densité de population de la zone desservie, etc. Mais ces informations ne sont disponibles que pour des cas très ponctuels et leur acquisition, à l'échelle globale du patrimoine, serait trop laborieuse par rapport au bénéfice qu'elles pourraient apporter au processus de décision.

Dans ces circonstances, nous proposons que ce paramètre soit soumis à la perception subjective des gestionnaires, à juger au cas par cas en fonction du contexte temporel et géographique des ouvrages : répercussions en voirie, sur les réseaux concessionnaires, environnement politique et social, etc.

#### *7.2.2.2 Critère « opportunité de travaux »*

La coordination des travaux de maintenance avec d'autres chantiers peut produire des économies et une diminution des impacts (Duarte, 2012). Ce critère permet de prendre en compte les opportunités de travaux qui peuvent se produire en fonction des interactions entre la programmation des travaux de maintenance et ceux de différentes natures. Pour sa construction nous considérons les paramètres suivants :

***Politique de rénovation de la RATP***

Ce paramètre tient compte des opportunités qui peuvent être occasionnées par la programmation de travaux qui sont d'une nature différente des campagnes de maintenance.

L'automatisation des lignes se réalise progressivement au sein du réseau RATP. Dans ce cas, les ouvrages concernés seront soumis à une augmentation de la fréquence de passage des matériels roulants et de trafic de voyageurs. Dans ces circonstances, où l'exploitation est si intense, les conséquences des défaillances s'amplifient. Il y a donc un vrai intérêt à réhabiliter en priorité les ouvrages des lignes qui seront automatisées afin de garantir un état structurel des ouvrages adapté au développement des exigences d'exploitation et de qualité de service.

Une autre campagne de rénovation de la RATP à prendre en compte pour la programmation des travaux de maintenance est le programme de renouvellement des stations de métro, en cours depuis 1998, qui prévoit la modernisation de 273 stations de métro. Il y a un intérêt réel à réaliser conjointement les travaux de maintenance et de renouvellement afin de réduire l'impact des chantiers.

***Travaux externes***
Nous avons vu dans les mécanismes de dégradation des tunnels maçonnés (Annexe 7) que les travaux tiers réalisés en proximité des tunnels peuvent avoir une influence sur la stabilité des ouvrages. Dans ces cas, il peut être judicieux (et parfois nécessaire) de renforcer les ouvrages et programmer des actions de maintenance avant la réalisation de ce type de travaux externes.

#### *7.2.2.3 Critère « groupement de travaux »*

Ce critère intervient dans une deuxième phase de notre méthodologie d'aide à la décision (§ 8.2). Il vise à éviter la dispersion géographique des chantiers de maintenance dans la définition des travaux de réhabilitation : une concentration de travaux de même nature permettrait de réaliser des économies d'échelle et faciliterait la logistique des chantiers. Ce critère est décomposé dans les paramètres suivants :

***Travaux connexes***
L'objectif de ce paramètre est de prioriser et programmer les travaux de réhabilitation ayant une proximité géographique.

***Travaux internes***
Certains ouvrages sont concernés par des PGE proposant plusieurs types de travaux sur le même ouvrage (principalement régénération, collage et réfection d'enduits). Ce paramètre permet de prioriser ce type de PGE, afin que l'ensemble des travaux proposés soient programmés conjointement.

### *7.2.3 Tests de cohérence d'une famille de critères (Roy et Bouyssou, 1993)*

Une fois définie une famille de critères adaptée à notre problématique, on passe en revue les principaux points de vue à partir desquels on peut déterminer si notre famille *F* de critères répond à ce que l'on en attend dans une perspective d'aide à la décision. A l´échelle individuelle, chaque critère de *F* renvoie à un modèle de préférences restreint. Leur ensemble doit permettre de modéliser les préférences des gestionnaires de la RATP à un niveau global. La famille *F* doit être apte à assurer une cohérence entre ces deux niveaux et trois axiomes minimaux peuvent être imposés à cet effet:

- L'exhaustivité ;
- La cohésion ;
- La non redondance des critères.

Celui qui propose ou à qui l'on propose de prendre appui sur une telle famille en vue d'une aide à la décision doit tout naturellement s'interroger sur l'adéquation de *F* à la situation. Une telle interrogation porte sur deux niveaux :

- Les aspects des conséquences qui ont trait à l'axe de signification « $j$ » sont-ils convenablement modélisés par le critère « $g_j$ », compte tenu de la présence des autres critères de la famille ?
- Les $n$ axes de signification auxquels renvoient les critères de *F* sont-ils séparément pertinents et globalement nécessaires et suffisants pour atteindre le but recherché ?

Il importe donc de savoir sur quel genre de considérations prendre appui pour juger si *F* peut ou non jouer le rôle qu'on veut lui faire jouer.

La famille de critères *F* associe, à chaque action potentielle « *a* » (dans notre cas, les ouvrages concernés par une PGE), les différentes évaluations qui nous permettent de les comparer entre elles et, ainsi, pouvoir configurer les programmes de maintenance. Il est important donc que tous les points de vue des gestionnaires soient reflétés par cette famille de critères.

En outre, la famille de critères doit savoir décrire, construire, communiquer et faire évoluer. Pour juger, dans une situation donnée, de la capacité de *F* à jouer cet ensemble de rôles, il faut adopter au moins quatre points de vue complémentaires :

- Les informations nécessaires au calcul des performances et seuils d'une action *a* reflètent-elles bien les éléments primaires à partir desquels les acteurs élaborent, justifient, transforment leurs préférences ?

  Ces éléments primaires, que nous avons représentés sous la forme de paramètres, concernent tous les attributs de *a*, tous les effets de sa mise à exécution qu'un acteur peut juger pertinents compte tenu de ses objectifs et de son système de valeurs. Ce sont les conséquences de l'action *a*. La question précédente porte, d'une part, sur la pertinence des conséquences que les informations nécessaires au calcul des performances et seuils permettent d'appréhender et, d'autre part, sur le fait qu'en fondant *F* sur ces seules informations, on ne laisse pas échapper d'autres conséquences tout aussi pertinentes.
- L'axe de signification auquel renvoie chaque critère, est-il aisément intelligible et acceptable par ceux des intervenants à qui s'adresse l'aide à la décision ?

  La manière dont les préférences d'un tel intervenant se forment, se raisonnent, se transforment, s'analyse tout naturellement à partir d'un petit nombre d'axes de signification. Ces axes de signification sont bien évidemment propres à chaque situation. Lorsque l'aide à la décision s'adresse à un unique intervenant, *F* ne pourra jouer les divers rôles qui lui sont dévolus que si les *n* axes de signification qu'elle comporte sont suffisamment en congruence avec son raisonnement pour qu'il en ait une compréhension suffisamment spontanée et qu'il les accepte comme référence fondamentale.
- La définition de certains critères ne fait-elle pas appel à des hypothèses (ayant trait à leurs structures ou à la valeur numérique de certains paramètres) qui figent prématurément les préférences là où elles apparaissent obscures ou contradictoires ?

  Dans la plupart des méthodes multicritère, la famille *F* est censée appréhender ce qui, dans les préférences des intervenants concernés, apparaît comme particulièrement « solide » et non contingent à un système de valeurs particulier. L'ensemble de critères d'une famille cohérente doit constituer un système de référence fondamental à partir duquel on puisse représenter, bâtir, discuter et modifier des préférences globales. Il est donc nécessaire qu'un assez large consensus puisse avoir lieu autour de cette part des préférences qui est prise en compte par chaque critère lorsque l'on se restreint à son axe de signification et que l'on raisonne toutes choses égales par ailleurs.
  Il faut de ce fait éviter de faire intervenir dans la définition des critères des valeurs numériques de paramètres destinées à rendre commensurables des catégories de conséquences fort hétérogènes. Dans ce cas, l'estimation ou l'interprétation des évaluations des critères donnerait lieu à des divergences si fortes que celles-ci pourraient conduire à une perte de corrélation entre les critères et les axes de signification qu'ils représentent.
- Y a-t-il cohérence entre ce que l'on sait, ou ce que l'on veut, au niveau des préférences globales et ce que la famille *F* amène logiquement à inférer à ce niveau ?

Compte tenu de ce qui a été dit précédemment quant à la signification d'une famille de critères et à celle des concepts de critères, il nous paraît raisonnable d'imposer certaines conditions à *F* pour que la cohérence soit garantie.

Dans la suite du document, nous présentons les axiomes qui assurent une cohérence « minimale » sans laquelle il nous semble difficile de concevoir un formalisme avec lequel travailler en pratique. Quand on propose une famille de critères *F* pour aborder un problème d'aide à la décision, il est toujours prudent de se demander, à la lumière des tests opérationnels, si aucun de ces axiomes de cohérence ne peut être contredit par le système de préférences globales que *F* a précisément pour objet d'aider à concevoir, à argumenter ou à transformer.

Lorsqu'en pratique un test opérationnel révèle une incohérence, celle-ci permet fréquemment de découvrir une inadéquation entre le critère retenu et les préférences, à un niveau restreint, qu'il était censé refléter. Les tests proposés ci-après permettent donc aussi des vérifications de cohérence sur d'autres plans que celui ayant trait à une bonne articulation entre chaque critère considéré isolément et la famille *F* considérée dans son ensemble.

#### *7.2.3.1 Axiome d'exhaustivité*

On entend par axiome d'exhaustivité que « chacune des conséquences servant à fonder les jugements de comparaison entre actions doit être prise en charge par l'un au moins des critères de *F* ».

Dans une situation d'aide à la décision donnée, il existe bien des manières de regrouper et de combiner entre eux les éléments primaires qui caractérisent les conséquences des actions (les paramètres dans notre cas) pour aboutir, en fin de compte, à la famille de critères *F* qui sera retenue. Quelles que soient les options prises, si deux actions *a* et *b* sont telles qu'on obtient la même évaluation selon tous les critères $\left(g_j(a) = g_j(b), \forall\, j \in F\right)$, alors il est impossible de différencier *a* et *b* dans un modèle de préférences globales fondées sur une telle famille de critères. Ainsi, pour que *F* puisse jouer le rôle qui lui est dévolu, il faut en particulier s'assurer qu'il est insensé de concevoir deux actions réalistes *a* et *b* qui auraient des vecteurs-performances $\underline{g}(a)$ et $\underline{g}(b)$ identiques à propos desquels on voudrait pourtant faire intervenir une autre relation que l'indifférence dans le modèle des préférences globales.

Pour une telle paire d'actions, le refus de l'indifférence doit nécessairement être fondé sur le fait que les éléments primaires à partir desquels se conçoivent, se justifient et se transforment les préférences ne sont pas identiques. S'il y a néanmoins égalité des performances sur tous les critères de *F*, c'est la preuve que, dans la manière d'agencer les informations de base pour calculer ces performances, il s'opère une perte de signification.

***Test opérationnel***

Avant de retenir une famille donnée *F* (éventuellement réduite à un seul critère) comme base d'un modèle de préférences globales, il est prudent de lui faire subir le test ci-après :

- Est-il possible d'imaginer deux actions *a* et *b,* d'évaluations identiques selon tous les critères $\left(g_j(a) = g_j(b), \forall\, j \in F\right)$ et, vis-à-vis desquelles, il soit néanmoins possible de faire valoir des arguments justifiant le refus de l'indifférence *a I b* ?

L'argument le plus simple est évidemment l'oubli, lors de la construction de critères, d'un facteur ou d'un attribut pertinent pour l'aide à la décision et qui, par conséquent, est susceptible de rompre l'égalité entre les performances caractérisant *a* et *b*.

Le recours à ce test peut conduire à faire surgir d'autres arguments révélant une insuffisance plus ou moins cachée de *F* vis-à-vis de l'exigence d'exhaustivité. Il peut s'agir d'anomalies dans

la définition de certains critères ou de l'oubli d'un axe de signification important qui, sans le test, pourrait pourtant passer inaperçu.

Dans notre cas, nous avons vérifié cet axiome de cohérence grâce à l'interaction avec les experts. Pour chaque critère proposé, nous avons imaginé deux actions à évaluations identiques et essayé d'identifier les arguments qui pourraient nous aider à prioriser une action par rapport à l'autre. Nous avons répété cette procédure de façon itérative jusqu'à n'identifier que des arguments non modélisables sous la forme de critères, soit par un manque d'information disponible, soit parce que leur contribution au processus décisionnel manque d'intérêt selon la façon de raisonner des décideurs. Tel a été le cas, par exemple, du « *coût des travaux* ». Ce coût unitaire est le même pour tous les ouvrages et ne permet donc pas d'établir un sens de préférence entre actions. Cet aspect de coût est uniquement pris en compte par les gestionnaires de la RATP pour établir les limites des campagnes de travaux, et non pour établir des priorités entre les ouvrages à traiter. Dans ces circonstances, le « *coût des travaux* » ne doit pas être considéré comme un critère de décision dans notre famille de critères. Néanmoins, nous expliquons dans la suite du document comment nous intégrons cet aspect de coût dans notre outil d'aide à la décision (§ 8.3).

Finalement, c'est aux gestionnaires de la RATP d'estimer la famille de critères proposée comme suffisamment exhaustive pour formaliser leur expertise.

#### *7.2.3.2 Axiome de cohésion*

« Une action quelconque $a$ est d'autant meilleure selon un quelconque critère $g_k$ que le nombre $g_k(a)$ (performance selon $g_k$) est plus grand ». Nous attirons à nouveau l'attention sur le fait que cette convention est non restrictive.

Cet axiome vise à cerner le minimum de cohésion qui doit exister entre le rôle dévolu localement par chaque critère $g_k$ au niveau des préférences restreintes à son axe de signification, et le rôle dévolu au même critère $g_k$ une fois immergé dans la famille de critères $F$ au niveau des préférences globales. Ce minimum de cohésion trouve tout d'abord sa source dans les considérations suivantes :

- Partant d'une quelconque action $b$, si, par un procédé quelconque, on accroît la performance d'une action $b$ sur un critère $k(g_k(b^k)>g_k(b))$, tout en maintenant inchangés les autres performances de $b$, alors l'action $b^k$ ainsi obtenue est au moins aussi bonne que l'action initiale $b(b^k\ S\ b)$.
- Si $b$ est comparable à une autre action $a$ selon une relation qui fait apparaître $b$ comme au moins aussi bonne que $a$ (préférence stricte, préférence faible ou indifférence), alors l'action améliorée $b^k$ (obtenue selon le procédé ci-dessus) demeure comparable à $a$ selon une relation qui traduit une préférence de $b^k$ sur $a$ au moins aussi solidement affirmée que celle existant primitivement entre $b$ et $a$.
- Si, par un procédé quelconque, on réduit la performance de $a$ sur un seul critère $k$, tout en maintenant les autres performances de $a$ inchangées ($g_k(a)>g_k(a_k)$), alors l'action $a_k$ ainsi obtenue demeure comparable à $b^k$, la préférence étant en faveur de $b^k$ et devant être au moins aussi clairement affirmée que celle existant primitivement entre $b$ et $a$.

En outre, dans le cas d'avoir des pseudo-critères dans la famille $F$, ce minimum de cohésion doit prendre en considération le caractère non significatif d'un écart de performance inférieur au seuil d'indifférence $q$ (§ 5.2.4). Soit $a$ et $b$ deux actions (comparables ou non au niveau des préférences globales) vérifiant $g_k(b)=g_k(a)$. Imaginons que, pour des raisons quelconques, on soit amené à réviser légèrement en hausse la performance $g_k(b)$ et légèrement en baisse la performance $g_k(a)$, l'écart entre les nouvelles valeurs restant inférieur à la valeur du seuil

d'indifférence ($g_k(b) - g_k(a) < q_k$). Une différenciation de si faible ampleur, à partir d'une performance initialement commune aux actions *a* et *b* n'est pas de nature (compte-tenu de la définition du seuil d'indifférence) à pouvoir altérer la manière dont se comparent les actions *a* et *b*.

***Test opérationnel***

L'exigence de cohésion, telle qu'elle vient d'être formulée, demande-t-elle à être testée en pratique ? Dès l'instant où chacune des fonctions d'évaluation des critères $g_j$ constituant *F* a été conçue de façon à être un critère, ne peut-on pas admettre que *F* satisfait naturellement l'axiome de cohésion ? Bien qu'il en soit généralement ainsi, des précautions s'imposent néanmoins. Il est donc opportun de s'assurer de l'acceptabilité de cet axiome comme base de raisonnement et fondement des rapports entre préférences globales réelles ou postulées et modèles de ces préférences bâties sur *F*. Pour cela, on peut avoir recours au test suivant :

- Est-il possible d'imaginer deux actions *a* et *b* devant vérifier l'indifférence *b I a,* vis-à-vis desquelles on puisse faire valoir des arguments justifiant le fait qu'en améliorant certaines des performances de *b* (les autres restant inchangées) et/ou en dégradant certaines des performances de *a* (les autres restant également inchangées), on parvienne à caractériser deux actions $b^*$ et $a_*$ telles que $b^*$n'apparaisse pas comme devant être au moins aussi bonne que $a_*$ ?

Il est clair que si ce test est positif en ce sens que l'on arrive à argumenter en faveur de *b I a* et Non($b^*$ *S* $a_*$) (l'action $b^*$ ne serait au moins aussi bonne que $a_*$), alors la famille *F* considérée contrevient à la première partie de l'axiome de cohérence. Il est dans ce cas indispensable :

- Soit de modifier *F* afin que le test ne paraisse plus pouvoir être positif ;
- Soit si, pour des raisons exceptionnelles, il faut conserver *F* en l'état, de veiller à ce que, dans le modèle de préférences globales bâti sur *F*, on n'ait pas *b I a* et $b^*$ *S* $a_*$ comme c'est automatiquement le cas avec les modèles usuels.

Dans notre cas, par exemple, l'action *a* « *Porte de Clignancourt / Simplon* » et l'action *b* « *Château Rouge / Barbes – Rochechouart* » sont en situation d'indifférence car elles présentent le même vecteur de performances selon les critères « *performance* » ($g_1$), « *impact de la défaillance* » ($g_2$) et « *opportunité de travaux* » ($g_3$) (tableau 7-5) :

| **Action** | **Performance du critère** | | |
|---|---|---|---|
| | $g_1$ | $g_2$ | $g_3$ |
| *a « Porte de Clignancourt / Simplon »* | 32 | 3 | 6 |
| *b « Château Rouge / Barbes – Rochechouart »* | 32 | 3 | 6 |

*Tableau 7-5 : Vecteurs de performance des actions « Porte de Clignancourt / Simplon » et « Château Rouge / Barbes- Rochechouart »*

Si on procède à améliorer, par exemple, la performance de l'action *b* selon critère $g_2$ et à la dégrader pour l'action *a* (les autres performances restant inchangées) on obtiendrait (tableau 7-6) :

| **Action** | **Performance du critère** | | |
|---|---|---|---|
| | $g_1$ | $g_2$ | $g_3$ |
| $a_*$*« Porte de Clignancourt / Simplon »* | 32 | **2** | 6 |
| $b^*$*« Château Rouge / Barbes – Rochechouart »* | 32 | **4** | 6 |

*Tableau 7-6 : Vecteurs de performances modifiés pour vérifier l'axiome de cohésion*

Dans ce cas hypothétique, les gestionnaires de la RATP considèreraient l'action $b^*$ comme prioritaire par rapport *à* $a_*$.Dans ce cas, la condition de l'axiome de cohésion « $b^*$apparait comme au moins aussi bonne que $a_*$ » est vérifiée.

#### *7.2.3.3 Axiome de non redondance*

« *F* ne comporte aucun critère redondant en ce sens que le retrait de n'importe quel critère de *F* définit une famille qui met en défaut l'un au moins des axiomes d'exhaustivité et de cohésion ».

Cette troisième et dernière exigence traduit un souci d'économie. Elle consiste à interdire, dans *F*, la présence de critères superflus. Considérons un critère $g_h$ de *F* et la famille *F\{h}* déduite de *F* en retirant ce critère. Admettons que les n-1 critères de *F\{h}* suffisent pour faire jouer à cette nouvelle famille le rôle initialement dévolu à *F*. Il est clair que $g_h$ est alors un critère redondant ; sur quoi prendre appui pour caractériser une telle propriété (l'hypothèse utilisée pour l'introduire paraît trop complexe pour être opératoire et formalisée) ?

Dès lors que l'on considère que, à côté de l'exigence dont il est ici question, seules les deux précédentes (exhaustivité et cohésion) sont à prendre en compte pour définir la notion de cohérence d'une famille *F*, il apparaît qu'un critère $g_h$ est redondant si et seulement si son retrait laisse une famille *F\{h}* satisfaisant aux deux exigences d'exhaustivité et de cohésion.

***Test opérationnel***

- Existe-t-il un critère $g_h$ dont le retrait de *F* définisse une famille vis-à-vis de laquelle aucun des tests de cohérence, cohésion et redondance ne fournisse de réponse positive ?

Pour vérifier cet axiome, nous proposons de retirer le *critère* « ***impact de la défaillance*** » de notre famille de critères. Cette nouvelle famille obtenue *F'*, comprenant comme critères uniquement la « ***performance*** » et « ***l'opportunité de travaux*** », satisferait-elle les axiomes d'exhaustivité et de cohésion ? Pour répondre à cette question, nous commençons par appliquer le test opérationnel de l'exhaustivité « est-il possible d'imaginer deux actions *a* et *b,* d'évaluations identiques selon tous les critères ($g_j(a) = g_j(b), \forall j \in F$ ) et, vis-à-vis desquelles, il soit néanmoins possible de faire valoir des arguments justifiant le refus de l'indifférence *a I b* ? ». Imaginons deux actions hypothétiques présentant la même évaluation de « ***performance*** » et « ***d'opportunité de travaux*** », existe-t-il des arguments permettant de défaire cette égalité ? Face à cette question, les gestionnaires de la RATP considèrent qu'il faudrait prioriser l'action affectant au nombre le plus élevé de voyageurs, ce qui n'est pas représenté par aucun des critères de *F'* et donc, elle ne peut pas être considérée comme exhaustive. Dans ce cas, la soustraction du critère « ***impact de la défaillance*** » donne lieu à une famille *F'* incohérente. Pourtant, le critère « ***impact de la défaillance*** » est considéré comme non redondant.

## 7.3 *Synthèse*

Dans ce chapitre nous avons présenté notre approche méthodologique pour construire les critères qui formalisent les aspects et les contraintes intervenant dans la gestion du patrimoine de la RATP. Ces critères sont « ***performance*** », « ***impact de la défaillance*** », « ***opportunité de travaux*** » et « ***groupement de travaux*** ».

Dans un premier temps, la construction du *critère de* « ***performance*** » a été réalisée à partir de la modélisation fonctionnelle des mécanismes de dégradation des tunnels maçonnés développée dans le Chapitre 6.

Dans un deuxième temps, le reste de critères ont été construits à partir de la formalisation de l'expertise. Pour ce faire, nous avons proposé de décomposer le raisonnement des gestionnaires de la RATP de façon hiérarchique. De cette façon, les *critères*, représentant les principaux axes de signification, sont divisés en *sous-critères* et *paramètres*. Dans cette étape, la collaboration avec les décideurs a été essentielle pour s'assurer que la famille de critères soit acceptée comme une base formalisée à partir de laquelle ils peuvent fonder leurs décisions.

Nous avons présenté les exigences techniques que doit respecter une famille de critères dans une perspective d'aide à la décision. Trois axiomes se sont imposés à cet effet : l'*exhaustivité*, la *cohésion* et la *non redondance*, auxquels nous avons soumis notre famille de critères.

Finalement, le tableau 7-7 présente la famille cohérente de critères de décision obtenue dans ce chapitre :

| | Critère | Sous-critère | Paramètre |
|---|---|---|---|
| ***Critère technique*** | ***Performance*** | **Performance à $T_0$** | Etat de santé (note MARION)<br>• Fissurations<br>• Infiltrations<br>• Déformation de la section du tunnel<br>• Ecrasement de la voûte au niveau des reins |
| | | | Age de l'ouvrage |
| | | | Historique d'opérations d'entretien<br>• Collage<br>• Régénération<br>• Réfection d'enduit |
| | | **Caractéristiques de l'ouvrage** | Largeur de l'ouvrage |
| | | **Cinétique** | Evolution constatée dans la notation MARION |
| | | | Fréquence des travaux de réhabilitation |
| | | **Agressivité de l'environnement** | Risques géotechniques liés aux terrains :<br>• Agressivité chimique du terrain encaissant<br>• Solubilité du terrain<br>• Comportement mécanique du terrain<br>• Perméabilité du terrain<br>• Fontis |
| | | | Risques hydrauliques :<br>• Nappe phréatique<br>• Réseaux divers fuyant<br>• Perméabilité de la voirie |
| ***Critères de gestion patrimoniale*** | ***Impact de la défaillance*** | Impact sur l'exploitation<br>• Défaillance affectant l'exploitation<br>• Fréquentation<br>• Correspondance | |
| | | Périmètre L2-L6 | |
| | | Image RATP | |
| | | Impacts externes : répercussions en voirie, environnement politique et social, etc. | |
| | ***Opportunité de travaux*** | Politique de rénovation de la RATP | |
| | | Travaux externes | |
| | ***Groupement de travaux*** | Travaux connexes | |
| | | Travaux internes | |

*Tableau 7-7 : Famille cohérente de critères obtenue*

***Outre la formalisation des points de vue et des contraintes intervenant dans le processus décisionnel, cette famille cohérente de critères nous a permis de rassembler et de synthétiser la totalité des informations disponibles à partir desquelles la comparaison des ouvrages à traiter sera effectuée dans notre outil d'aide à la gestion du patrimoine RATP. Mais ces comparaisons, dans la plupart des cas, donneront lieu à des situations où les différents critères peuvent être conflictuels dans leurs évaluations. Dans ces circonstances, il faut disposer de méthodes multicritère d'aide à la décision permettant de construire le compromis entre les différents critères. La formalisation des problématiques décisionnelles au travers des outils multicritère permettra en plus de faciliter les échanges entre acteurs techniques et non techniques (Chapitre 8).***

# Chapitre 8. Construction d'un outil multicritère d'aide à la gestion patrimoniale de la RATP

Ce chapitre propose une démarche pour construire un outil multicritère d'aide à la décision adapté à la gestion du patrimoine de la RATP. Dans un premier temps, nous présentons les différentes problématiques que nous devons aborder, en cohérence avec le processus décisionnel des gestionnaires de la RATP. Ensuite, nous justifions le choix des méthodes multicritère sur lesquelles s'appuie notre outil d'aide à la décision.

***Dans notre cas, l'aide à la décision ne se situe pas dans une logique d'optimisation au sens classique du terme. Il ne s'agit pas de déterminer l'optimum d'une fonction objectif, le minimum d'une fonction coût ou le maximum d'une fonction sécurité, sous des contraintes d'exploitation données. Il s'agit plutôt de justifier la politique de maintenance qui met en évidence les raisons des décisions arrêtées et de formaliser la planification des opérations de maintenance sur le réseau.***

Il est donc opportun de bien décomposer le processus de décision qui va du recueil des mesures sur l'état structurel des ouvrages jusqu'à la planification de l'opération au niveau global du réseau et de bien définir les problématiques intervenant à chaque étape. Dans ce cas, nous proposons de développer notre outil d'aide à la gestion patrimoniale de la RATP en quatre étapes :

- ***Etape 1 : gestion à long terme.*** Les différentes propositions de gros entretien (PGE) sont classées en fonction de leur priorité en quatre catégories, définies en cohérence avec la méthode existante (notation MARION) :
  - CAT 1 : surveillance (pas de travaux de maintenance) ;
  - CAT 2 : traitement à long terme (+8 ans) ;
  - CAT 3 : traitement à moyen terme (entre 8 et 4 ans) ;
  - CAT 4 : traitement à court terme (entre 1 et 4).
- ***Etape 2 : gestion à court terme.*** Hiérarchisation des PGE de chaque catégorie définie dans l'étape précédente. Les PGE sont ordonnées de la plus prioritaire à la moins prioritaire.
- ***Etape 3 : limitation des ressources disponibles.*** Définition des limites de la programmation en fonction des ressources disponibles. Une fois que les PGE ont été priorisées, la programmation des travaux de maintenance sera établie conformément à la hiérarchie définie à l'étape 2 jusqu'à épuiser les ressources technico-économiques disponibles.
- ***Etape 4 : évaluation de la programmation obtenue***. Cette dernière étape est un indicateur, permettant de vérifier si les budgets mis à disposition sont ou non suffisants.

La définition des méthodes multicritère nécessaires pour construire de notre outil d'aide à la gestion patrimoniale sera réalisée en fonction des problématiques à aborder et des caractéristiques des critères de décision qui interviennent dans chaque étape. Pour réaliser nos choix, nous nous baserons sur les méthodes proposées par (Lemaire, 2006) et (Roy et Bouyssou, 1993) que nous avons introduites dans § 5.4.4.

## 8.1 *Etape 1 : gestion à long terme*

Cette étape vise à donner aux gestionnaires de la RATP une vision globale de l'état du patrimoine. Tous les ouvrages sont classés dans des catégories de priorité qui ont été définies en cohérence avec la notation MARION (fig. 8-1) :

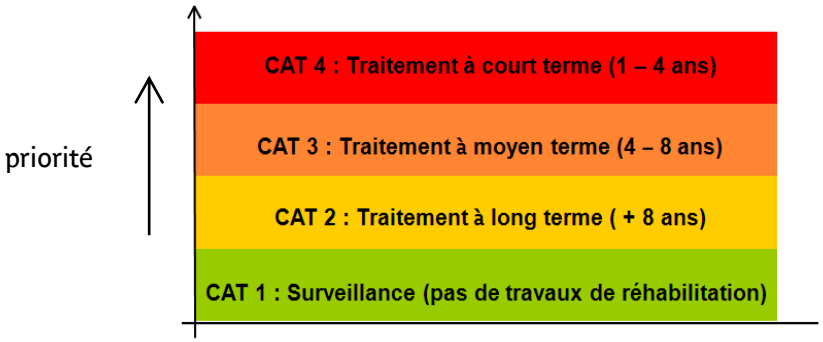



*Figure 8-1 : Catégories de priorité*

### *8.1.1 Choix d'une méthode multicritère d'aide à la décision adaptée à l'étape 1*

Dans cette étape, nous sommes face à un problème de classement des ouvrages en catégories ordonnées. Dans un contexte d'aide à la décision, **il s'agit d'un problème de tri (P.β)**.

Les critères de décision qui interviennent dans cette phase et leurs caractéristiques sont détaillés dans le tableau 8-1 :

| Critère | Type | Echelle d'évaluation |
|---|---|---|
| C1 : Performance | pseudo-critère | qualitative ordinale (3 – 56) |
| C2 : Impact de la défaillance | vrai critère | qualitative ordinale (1 – 7) |
| C3 : Opportunité de travaux | vrai critère | qualitative ordinale (1 – 7) |

*Tableau 8-1 : Critères intervenant dans l'étape 1 de l'outil d'aide à la décision*

Selon l'arbre de décision proposé par (Lemaire, 2006) (§ 5.4.4), dans le cas d'une problématique de tri, deux approches sont possibles : celle du critère unique de synthèse ou celle du surclassement de synthèse. Notre famille cohérente de critères de décision est hétérogène : nous avons des critères de différentes natures (*pseudo-critères* et *vrais critères*) et différentes échelles d'évaluation. Dans ce cas, l'approche du surclassement de synthèse s'avère comme la plus adaptée (§ 5.4.4). Enfin, notre problématique de tri présente quatre catégories (fig. 8-1). Dans ce contexte, ***la méthode proposée est ELECTRE TRI*** (fig. 8-2).

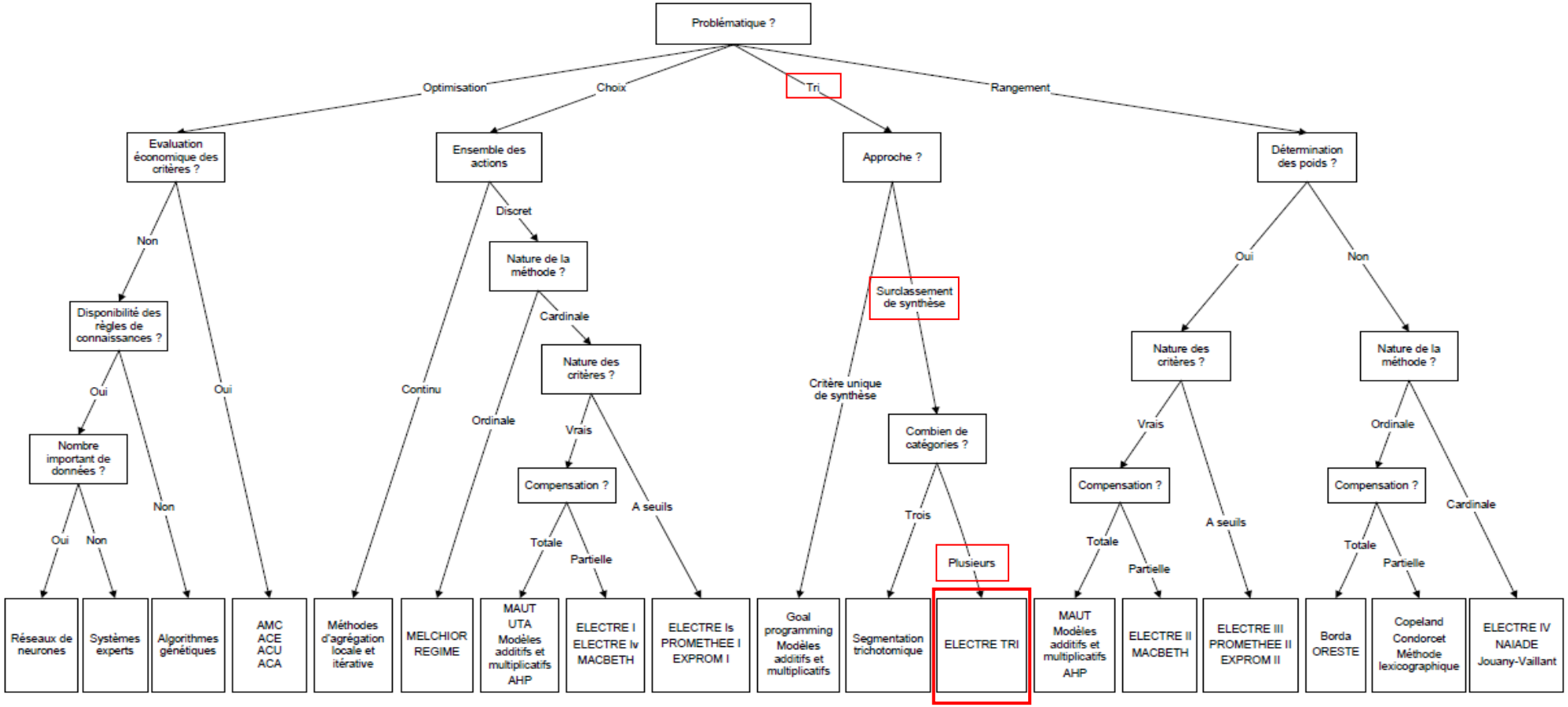



*Figure 8-2 : Choix de la méthode multicritère d'aide à la décision pour l'étape 1 : problématique de tri (Lemaire, 2006)*

### 8.1.2 Résultats attendus de l'étape 1

***Comme résultat attendu de cette étape, la distribution des ouvrages par catégories de priorité permettrait d'avoir une vision à long terme de la gestion et de proposer un ordre de grandeur des budgets nécessaires. Nous pourrions alors fournir aux gestionnaires de la RATP un outil leur permettant de répondre à la question « quelle est le budget nécessaire pour assurer une gestion du patrimoine appropriée sur le long terme ? ».***

## 8.2 *Etape 2 : Gestion à court terme*

Les résultats obtenus au terme de l'étape précédente ne sont pas suffisamment précis pour définir une programmation de travaux. C'est pourquoi nous proposons de réaliser une analyse plus fine, permettant d'établir, au sein de chaque catégorie, une hiérarchisation des ouvrages selon un ordre décroissant de priorité. Pour ce faire, nous complétons la famille de critères considérée dans cette étape avec l'incorporation d'un quatrième critère de décision : le « ***groupement de travaux*** » (§ 7.2.2.3) : la famille de critères intervenant dans cette étape est représentée par le tableau 8-2 :

| Critère | Type | Echelle d'évaluation |
|---|---|---|
| $C_1$ : Performance | pseudo-critère | qualitative ordinale (3 – 56) |
| $C_2$ : Impact de la défaillance | vrai critère | qualitative ordinale (1 – 7) |
| $C_3$ : Opportunité de travaux | vrai critère | qualitative ordinale (1 – 7) |
| $C_4$ : Groupement de travaux | vrai critère | qualitative ordinale (0 – 5,5) |

*Tableau 8-2 : Critères intervenant dans l'étape 2 de l'outil d'aide à la décision*

Dans un contexte d'aide à la décision multicritère, **nous sommes face à un problème de rangement (P.γ)**.

### 8.2.1 Choix d'une méthode multicritère d'aide à la décision adaptée à l'étape 2

Dans le cadre d'une problématique de rangement, l'arbre de décision de (Lemaire, 2006) propose différentes méthodes en fonction de la nature des critères qui y interviennent. Dans un premier temps, le choix dépend de si les critères sont pondérés ou non. Dans notre cas, afin de simplifier notre étude, nous partons de la base où tous les critères ont le même poids dans le processus décisionnel. Néanmoins, nous considérons adéquat de conserver la possibilité de pondérer les critères afin de mieux assurer l'adaptation de notre outil aux préférences des gestionnaires de la RATP. Dans ce cas, l'étape suivante du choix dépend de la nature des critères. Vu que le *critère de* « ***performance*** » est un pseudo-critère (à seuils), l'arbre de décision propose trois méthodes : ELECTRE III, PROMETHEE II et EXPROM II (fig. 8-3).

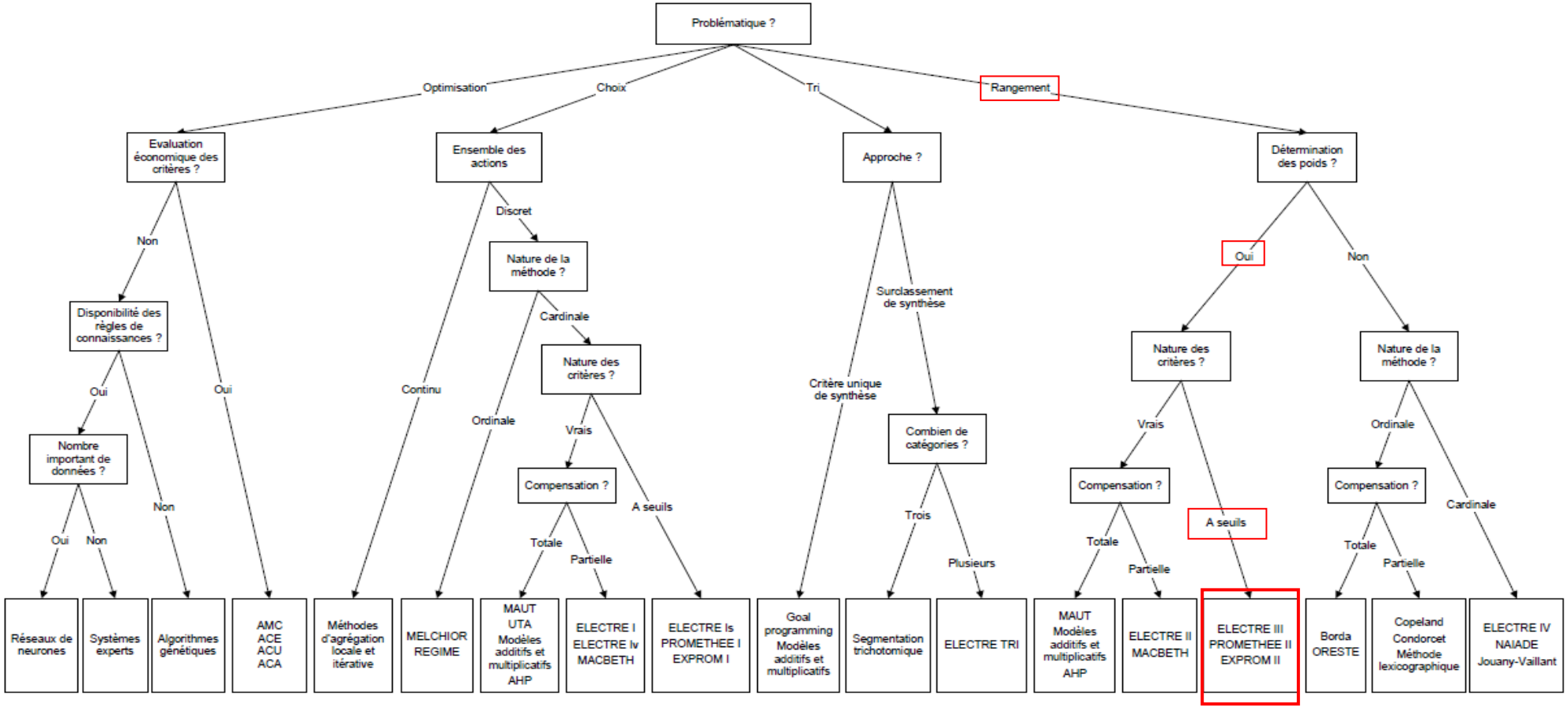



*Figure 8-3 : Choix de la méthode multicritère d'aide à la décision pour l'étape 2 : problématique de rangement (Lemaire, 2006)*

A ce moment, nous avons trois méthodes multicritère susceptibles d'être appliquées. Les gestionnaires peuvent alors faire intervenir leur subjectivité pour réaliser un choix (Roy et Bouyssou, 1993). Dans ce cas, nous proposons de retenir la méthode ELECTRE III afin d'obtenir une démarche la plus homogène possible en termes de familles de méthodes à utiliser. Vu que la méthode ELECTRE TRI a été retenue pour l'étape précédente, les gestionnaires de la RATP sont déjà familiarisés avec la famille de méthodes ELECTRE. Dans ce contexte, ajouter une famille de méthodes multicritère différente pour cette étape produirait un effort supplémentaire pour « s'approprier » l'outil d'aide à la décision que l'on vise à construire.

Néanmoins, pour renforcer notre choix de la méthode ELECTRE III pour cette étape, nous recourrons à la méthode de choix proposée par (Roy et Bouyssou, 1993) que nous avons présentée dans § 5.4.4. Le tableau 7-16 montre que la méthode PROMETHEE ne permet pas de considérer le seuil de veto. Nous rappelons que nous faisons intervenir le veto dans la construction du *critère de* « performance », afin d'assurer que les ouvrages présentant certains désordres « inadmissibles » doivent automatiquement faire partie de la programmation de travaux, indépendamment de leurs évaluations par rapport au reste de critères (§ 7.1.2). Dans ce cas, la méthode PROMETHEE ne s'avère pas adaptée à notre problématique. La méthode EXPROM, n'étant qu'une extension de la méthode PROMETHEE, elle n'apporte pas, par conséquent, une réelle alternative dans le déroulement des calculs et des résultats (Lemaire, 2006). Dans ce contexte, nous optons donc pour retenir la méthode ELECTRE III.

| **Méthodes** | **Problématique** | **Paramètres économiques** | | | **Caractéristiques du s.r.p.** |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **Seuils d'indifférence, préférence** | **Pondération** | **Veto** | |
| ELECTRE I | α | Non | Oui | Oui | 1 relation nette de surclassement avec niveau de concordance |
| ELECTRE Is | α | Oui | Oui | oui | 1 relation nette de surclassement avec niveau de concordance +1 (éventuel) indicateur de robustesse |
| ELECTRE TRI | β | Oui | Oui | Oui | 1 relation nette de surclassement + des profils limites |
| ELECTRE II | γ | Non | Oui | oui | 2 relations emboîtées de surclassement avec niveaux de concordance |
| PROMETHEE | γ | Oui | Oui | non | 1 relation floue de préférence |
| ELECTRE III | γ | Oui | Oui | oui | 1 relation floue de surclassement |
| ELECTRE IV | γ | Oui | Non | Oui | De 2 à 5 relations emboîtées de surclassement |

*Tableau 8-3 : Caractéristiques des principales méthodes de type ELECTRE (Roy et Bouyssou, 1993)*

### 8.2.2 Résultats attendus de l'étape 2

***Cette étape nous permet d'obtenir une hiérarchisation des ouvrages par priorité décroissante (fig. 8-4) :***

MAX

Priorité décroissante

MIN

| | |
|---|---|
| 1 | Château Rouge / Barbes – Rochechouart |
| 2 | Saint Sulpice / Saint Placide |
| 3 | GARE DE L'EST |
| 4 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice |
| 5 | PORTE DE CLIGNANCOURT |
| 6 | Barbes - Rochechouart / Gare du Nord |
| ... | |
| n | Gare du Nord / Gare de l'Est |

*Figure 8-4 : Etape 2 : hiérarchisation des ouvrages par ordre de priorité décroissante*

***Ce rangement des ouvrages en fonction de leur priorité sera la base pour définir une programmation optimisée des travaux de maintenance.***

## 8.3 *Etape 3 : Limitation des ressources disponibles*

A partir de la programmation obtenue dans l'étape précédente, on associe un coût à chaque action. On déroule ensuite la liste des opérations jusqu'à l'épuisement du budget disponible.

**PROGRAMMATION DE TRAVAUX**

MAX

Priorité décroissante

MIN

| | |
|---|---|
| 1 | Château Rouge / Barbes – Rochechouart |
| 2 | Saint Sulpice / Saint Placide |
| 3 | GARE DE L'EST |
| 4 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice |
| 5 | PORTE DE CLIGNANCOURT |
| 6 | Barbes - Rochechouart / Gare du Nord |
| ... | |
| n | Gare du Nord / Gare de l'Est |

Limite de ressources disponibles

*Figure 8-5 : Etape 3 : définition de la limite des ressources disponibles*

***A ce stade, nous avons fourni aux gestionnaires de la RATP une programmation optimisée des travaux de réhabilitation en fonction des ressources technico-économiques disponibles. Nous devons préciser que notre outil d'aide à la décision n'intervient que pour proposer et hiérarchiser les ouvrages qui doivent être traités dans la programmation de travaux de maintenance. L'objectif de notre méthodologie n'est pas de déterminer un budget annuel d'investissement, qui reste une décision de politique interne à la RATP.***

***Néanmoins, les résultats que nous obtenons, alliés à la connaissance exhaustive du patrimoine des ouvrages de génie civil, peuvent nous servir à mesurer si les travaux à réaliser (dans leur ensemble ou par type) sont pertinents en termes de volume, et à anticiper les moyens qui seraient nécessaires dans les programmations futures vis-à-vis de la pérennité du patrimoine. Cela fait l'objet de l'étape 4 de notre méthodologie.***

## 8.4 Etape 4 : Evaluation de la programmation obtenue

*Préambule* : les travaux réalisés dans le cadre de la maintenance des infrastructures ont vocation à améliorer l'état structurel des ouvrages. Le bénéfice obtenu pour un ouvrage est donc la somme de l'ensemble des améliorations individuelles engendrées par ces travaux de réhabilitation.

Aujourd'hui, le seul moyen existant pour mesurer l'amélioration de l'état structurel des ouvrages est la note MARION, basée sur les inspections visuelles. Mais nous avons vu que la note MARION ne reflète pas ces améliorations (Rysak, 2013) : par exemple, les bénéfices de la régénération sont « internes à la structure » et souvent peu visuelles, là où ceux de la réfection d'enduits sont avant tout esthétiques, mais souvent sans grands effets structurels.

C'est pourquoi nous proposons, au travers de cette quatrième étape, de considérer la totalité du patrimoine (les surfaces d'ouvrages pour la régénération ou les réfections d'enduits) et d'analyser les bénéfices de nos programmes de travaux relativement aux durées d'amortissement connues des travaux de réhabilitation (fig. 8-6) (Annexe 11).

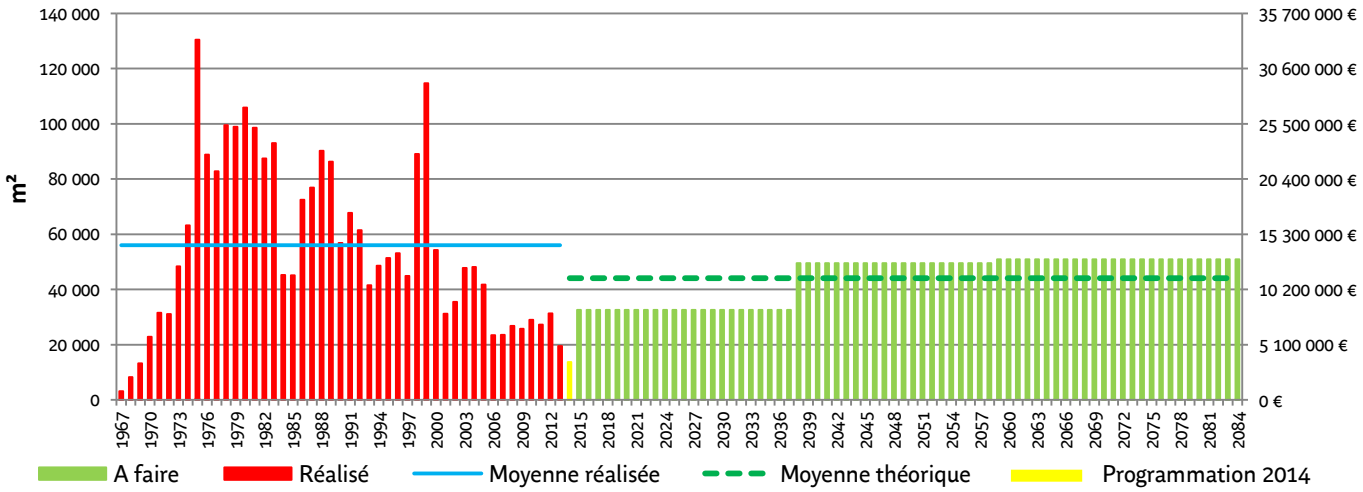



*Figure 8-6 : Evaluation de la programmation obtenue : régénération de la maçonnerie*

***Cette dernière étape pourra servir d'argument aux gestionnaires de la RATP pour justifier que les budgets disponibles sont insuffisants pour mettre en place une politique de maintenance durable ou, à l'opposé, s'il peut être envisagé de diminuer les investissements à prévoir dans le futur.***

## 8.5 *Synthèse*

Dans cette section, nous avons proposé une démarche pour construire un outil multicritère d'aide à la décision adapté à la problématique de la gestion du patrimoine de la RATP. Pour ce faire, nous nous sommes basés sur le processus décisionnel de la gestion patrimoniale de la RATP que nous avons décomposé en quatre étapes (tableau 8-4) :

- ***Etape 1 : gestion à long terme***. Cette étape vise à fournir aux gestionnaires de la RATP une vision à long terme de la gestion et à proposer un ordre de grandeur des budgets nécessaires, permettant d'anticiper les besoins futurs. Pour ce faire, les propositions de gros entretien (PGE) sont classées en quatre catégories de priorité, en cohérence avec celles proposées par la notation MARION. Dans cette étape, nous sommes confrontés à un problème de tri (P.β). Les critères de décision qui interviennent sont les critères « ***performance*** », « ***impact de la défaillance*** » et « ***opportunité de travaux*** ». La méthode multicritère choisie est ELECTRE TRI.
- ***Etape 2 : gestion à court terme***. Les résultats obtenus dans l'étape précédente ne sont pas assez fins pour élaborer une programmation optimisée des travaux de maintenance. Une fois les PGE classées dans des catégories de priorité, nous proposons de les hiérarchiser par ordre décroissant de priorité. Nous sommes donc confrontés à un problème de rangement (P.γ). Les critères utilisés sont la « ***performance*** », l'« ***impact de la défaillance*** », l'« ***opportunité de travaux*** » et le « ***groupement de travaux*** ». La méthode multicritère retenue est ELECTRE III.
- ***Etape 3 : limitation des ressources disponibles.*** Une fois les PGE hiérarchisées par ordre décroissant de priorité, on associe un coût à chaque action. Ensuite, en fonction du ressources technico-économiques disponibles, on retient les actions les mieux classées dans l'étape 2 jusqu'à l'épuisement du budget disponible et/ou de la capacité de mise en œuvre.
- ***Etape 4 : évaluation de la programmation obtenue.*** Dans cette dernière étape, nous proposons une évaluation de la programmation obtenue à partir d'une comparaison des $m^2$ de travaux de réhabilitation définies lors de l'étape 3 avec une programmation théorique obtenue à partir des durées d'amortissement des travaux de réhabilitation.

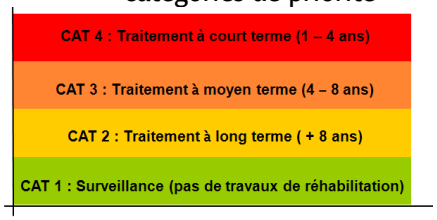
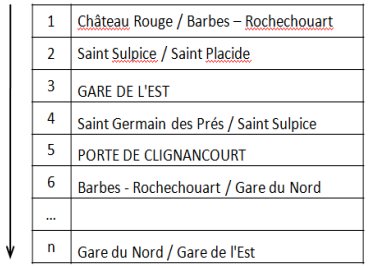
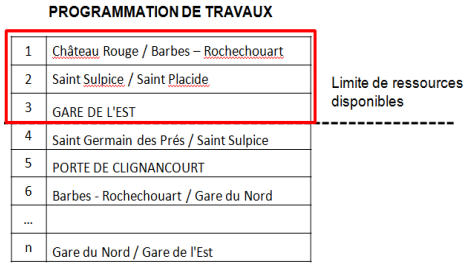
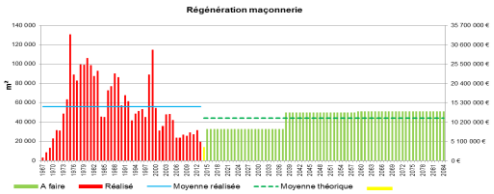
<table>
<tr><th>ETAPE 1 :<br>Gestion à long terme</th><th>ETAPE 2 :<br>Gestion à court terme</th><th>ETAPE 3 :<br>Limitation des ressources disponibles</th><th>ETAPE 4 :<br>Evaluation de la programmation obtenue</th></tr>
<tr><td>Objectif : classement des ouvrages en catégories de priorité<br> 
</td>
<td>Objectif : hiérarchisation des ouvrages par ordre décroissant de priorité<br> 
</td>
<td>Objectif : définir les limites de la programmation en fonction des ressources disponibles<br> 
</td>
<td>Objectif : évaluer la programmation obtenue<br> 
</td></tr>
<tr><td>Critères :<br>▪ C1 : « performance » (pseudo-critère)<br>▪ C2 : « impact de la défaillance » (vrai critère)<br>▪ C3 : « opportunité de travaux » (vrai critère)</td>
<td>Critères :<br>▪ C1 : « performance » (pseudo-critère)<br>▪ C2 : « impact de la défaillance » (vrai critère)<br>▪ C3 : « opportunité de travaux » (vrai critère)<br>▪ C4 : « groupement de travaux » (vrai critère)</td>
<td rowspan="3">Données :<br>▪ Coût de la réhabilitation<br>▪ Ressources technico-économiques disponibles</td>
<td rowspan="3">Données :<br>▪ Programmation obtenue<br>▪ Durée d'amortissement des travaux de réhabilitation</td></tr>
<tr><td>Problématique de tri</td><td>Problématique de rangement</td></tr>
<tr><td>Méthode multicritère : ELECTRE TRI</td><td>Méthode multicritère : ELECTRE III</td></tr>
</table>

*Tableau 8-4 : Synthèse des étapes de l'outil d'aide à la gestion du patrimoine de la RATP*

Les démarches de sélection des méthodes multicritère d'aide à la décision proposées par (Lemaire, 2006) et (Roy et Bouyssou, 1993) nous ont permis de choisir les méthodes qui nous permettront d'aborder les étapes 1 et 2 de notre outil d'aide à la gestion patrimoniale de la RATP. Nous avons retenu la famille de méthodes ELECTRE qui, dans le cadre de notre recherche, présentent les avantages suivants :

- Ces méthodes permettent de prendre en compte des critères de différentes natures. Dans notre cas : un *pseudo-critère* de « ***performance*** », et des *vrai-critères* pour le reste de critères.
- Les méthodes ELECTRE permettent de garder les évaluations de chaque action sur leur échelle originale, au contraire des méthodes de type critère unique de synthèse qui exigent une même échelle pour l'ensemble des critères. Dans notre cas, le *critère de* « ***performance*** » présente une échelle d'évaluation différente du reste.
- Les évaluations de chaque action selon les différents critères restent visibles, ce qui améliore la transparence du processus décisionnel. De cette façon, il est plus facile d'identifier les arguments qui justifient les prises de décisions.
- L'application des méthodes ELECTRE TRI (étape 1) et ELECTRE III (étape 2) pour développer notre outil d'aide à la gestion nous permet d'utiliser des méthodes dont les principes de fonctionnement restent assez proches, ce qui facilite la compréhension des décideurs qui ne sont pas nécessairement familiarisés avec les outils de l'aide à la décision multicritère.

Les étapes 1 et 2 nous permettent de choisir et de hiérarchiser les ouvrages qui doivent faire partie des programmations des travaux de maintenance. Grâce aux outils multicritère d'aide à la décision, nous pouvons proposer des programmations de travaux optimisées tenant compte de tous les aspects qui interviennent dans la gestion patrimoniale de la RATP.

Les étapes 3 et 4 nous permettent d'intégrer dans notre outil d'aide à la gestion les contraintes technico-économiques qui limitent la capacité de mise en œuvre des programmations. L'étape 3 nous permet de définir où se situent ces limites par rapport à la programmation de travaux. Ensuite, l'étape 4 nous permet d'évaluer, selon une perspective sur le long terme, si les programmations obtenues sont durables vis-à-vis de la pérennité du patrimoine.

# Synthèse de la Partie III

Pour optimiser la gestion patrimoniale de la RATP, nous avons procédé dans cette partie à la construction d'un outil multicritère d'aide à la gestion du patrimoine de la RATP. Dans l'étape de modélisation d'un tel outil, le choix des méthodes de construction des critères intervenants et des méthodes multicritère se conditionnent réciproquement. Par exemple, si l'on se trouve dans la perspective d'utiliser une approche de type « *critère de synthèse* », les critères devraient être formulés sur la base d'une échelle unique avec une unité commune (cf. Keeney et Raïffa, 1976). Il est fréquent de réaliser ces choix simultanément mais, dans le cas où le décideur n'est pas assez familiarisé avec les outils multicritère, cela peut conduire à une confusion et limiter son adhésion et sa compréhension de l'outil.

Dans le but de construire un outil d'aide à la décision simple et adapté au processus décisionnel des gestionnaires de la RATP, nous avons clairement isolé ces deux étapes de notre modélisation. Dans un premier temps, nous avons construit nos critères avec pour principal but de modéliser fidèlement et intelligiblement les préférences du décideur (Chapitre 7). Dans un second temps, nous avons réalisé le choix de la méthode multicritère en fonction des caractéristiques de notre famille de critères et les problématiques à aborder (Chapitre 8).

La construction de notre famille cohérente de critères de décision a été réalisée en deux temps : la construction d'un *critère de* « ***performance*** » et la construction des *critères de gestion patrimoniale* (fig. III-2). Les constructions de ces deux groupes de critères partent de deux principes différents : la construction du *critère de* « ***performance*** » est basée sur les résultats de l'application des outils de la Sûreté de Fonctionnement, tandis que la construction des *critères de gestion patrimoniale* se base sur la formalisation de l'expertise.

L'application des méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement nous a permis de modéliser le fonctionnement et les mécanismes de dégradation des tunnels maçonnés tenant compte de son environnement et du contexte urbain (Chapitre 6). Ces résultats nous ont permis d'identifier et de de structurer l'information prise en compte pour construire le *critère de* « ***performance*** ». De cette façon, nous pouvons mieux exploiter les informations compilées lors des visites et inspections qui, parfois, sont masquées par la note MARION ou, tout simplement, se perdent lors des transmissions d'informations entre les différents intervenants du processus décisionnel. Dans le cadre de la gestion patrimoniale, les bénéfices apportés par ces résultats permettent une amélioration du diagnostic des ouvrages grâce à l'obtention d'une liste exhaustive des désordres (AMDE) et d'une meilleure compréhension des causes des défaillances observables lors des inspections visuelles (graphes causaux).

Sur la base de ces résultats, nous avons construit le *critère de* « ***performance*** » en combinant deux approches : les règles d'affectation (Azibi, 2003) et l'arbre d'agrégation (Labbouz, 2008) (§ 7.1). L'évaluation de ce critère est liée à l'imprécision des informations prises en compte (note MARION) et à l'incertitude produite par un manque d'information (historique des ouvrages les plus anciens, par exemple). Suite à ces limitations dans la construction du *critère de* « ***performance*** » il est plus convenable de le considérer comme un *pseudo-critère*. Cette condition de *pseudo-critère* a été essentielle pour définir les méthodes multicritère d'aide à la décision et nous a amené à privilégier les méthodes ELECTRE pour développer notre outil d'aide à la gestion.

Du point de vue de la gestion patrimoniale, le *critère de* « ***performance*** » synthétise les différents aspects techniques qui interviennent dans la gestion patrimoniale de la RATP. En outre, il nous permet d'établir une première hiérarchisation des ouvrages à traiter en fonction d'une analyse des risques et d'une évaluation de la performance plus exhaustive que celle fournie par la notation MARION.

Les *critères de gestion patrimoniale* (§ 7.2) formalisent les aspects et les contraintes qui interviennent entre la phase d'évaluation de la « ***performance*** » et la configuration définitive de la programmation de travaux. Ces critères sont « ***impact de la défaillance*** », « ***opportunité de travaux*** » et « ***groupement de travaux*** ». Leur construction est basée sur l'avis des experts, dont aucune formalisation n'existait a priori. Pour ce faire, nous avons décomposé le raisonnement des gestionnaires de la RATP de façon hiérarchique. Les principaux axes de signification sont représentés par les *critères*. Ensuite, ces *critères* ont été divisés en *sous-critères* et *paramètres* (fig. 7-5). Nous avons à nouveau traité un problème de construction de critères nécessitant l'agrégation de différentes dimensions de préférence. Afin d'assurer une homogénéité dans les démarches de construction, nous avons utilisé les règles d'affection (Azibi, 2003), de la même façon que lors de la construction du *critère de* « ***performance*** » (Annexe 8).

Dans un premier temps, nous avons obtenu une famille cohérente de critères de décision (« ***performance*** », « ***impact de la défaillance*** », « ***opportunité de travaux*** » et « ***groupement de travaux*** »). Dans un deuxième temps, nous avons vérifié qu'elle répond aux exigences d'*exhaustivité, cohésion,* et *non redondance.* Cette famille de critères de décision synthétise l'information disponible et permet qu'elle soit traitée par l'outil d'aide à la gestion patrimoniale de la RATP.

Le développement de cet outil (Chapitre 8) vise à renforcer les arguments qui interviennent dans les prises de décisions et de formaliser la planification des opérations de maintenance sur le réseau. Nous avons décomposé le processus décisionnel en quatre étapes :

- ***Etape 1 : gestion à long terme***. Cette étape vise à classer les propositions de gros entretien en quatre catégories de priorité, en cohérence avec celles proposées par la notation MARION. Dans cette étape, nous nous sommes confrontés à un problème de tri (P.β) pour lequel nous avons retenu la méthode multicritère ELECTRE TRI.
- ***Etape 2 : gestion à court terme***. Une fois les PGE ont été classées dans des catégories de priorité, cette étape vise à les hiérarchiser par ordre décroissant de priorité. Il s'agit ici d'un problème de rangement (P.γ) où la méthode multicritère retenue est ELECTRE III.
- ***Etape 3 : limitation des ressources disponibles.*** A partir de la hiérarchisation des PGE définie dans l'étape 2, cette étape détermine les limites de la programmation de travaux en fonction des ressources technico-économiques disponibles.
- ***Etape 4 : évaluation de la programmation obtenue.*** Dans cette dernière étape, nous proposons une évaluation de la programmation obtenue à partir d'une comparaison des $m^2$ de travaux de réhabilitation définies lors de l'étape 3 avec une programmation théorique obtenue à partir des durées d'amortissement de travaux de réhabilitation.

***Les étapes 1 et 2 nous permettent respectivement de choisir et de prioriser les ouvrages qui doivent faire partie des travaux de réhabilitation. De cette façon, nous pouvons proposer des programmations de travaux optimisées à partir d'une vision globale de tous les aspects qui interviennent dans la gestion patrimoniale. Néanmoins, la capacité à mettre en œuvre ces programmations est limitée par les ressources techniques et économiques disponibles et donc, l'application des travaux de maintenance doit être distribuée dans le temps.***

***Les étapes 3 et 4 nous permettent respectivement de définir les limites des programmations à réaliser chaque année et d'évaluer, selon une perspective sur le long terme, si les programmations obtenues sont durables vis-à-vis de la pérennité du patrimoine.***

# Partie IV
# Application de l'outil d'aide à la gestion du patrimoine de la RATP : ligne 4 du métro de Paris

# Introduction de la Partie IV

Cette partie est consacrée à l'application pratique de l'outil d'aide à la gestion du patrimoine de la RATP développée dans la Partie III. L'objectif est de tester sa capacité à proposer des programmations de maintenance optimisées et d'identifier les limites et les axes d'amélioration de cet outil.

Cette étude est réalisée sur un cas réel : la ligne 4 du métro de Paris. Le Chapitre 9 présente les caractéristiques de cette ligne et justifie le choix de la ligne 4 de métro comme échantillon représentatif du réseau de la RATP. Enfin, le Chapitre 10 présente l'application du modèle, les résultats obtenus et une réflexion sur la pertinence de l'outil d'aide à la gestion du patrimoine de la RATP.

# Chapitre 9. Présentation de la ligne 4 du métro de Paris

Ce chapitre présente la ligne 4 du métro de Paris. Pour ses caractéristiques, cette ligne s'avère comme un échantillon représentatif du réseau de la RATP.

## 9.1 *Historique*

La ligne 4 du métro est une des plus anciennes du réseau de transport ferroviaire de la RATP. La conception du réseau, en 1896, ne prévoyait l'établissement que de trois lignes (Biette, 1928). La ville de Paris couvrait en effet une surface grossièrement circulaire, et l'implantation de ces trois lignes répondait à une logique facilement compréhensible : la première suivant un tracé circulaire sensiblement placé à mi-distance du centre et de la périphérie (les lignes 2 et 6) ; les deux autres suivant deux diamètres de ce cercle, l'un dans la direction est-ouest (ligne 1), le second dans la direction nord-sud : la ligne 4.

Dès 1896, où elle fut conçue pour lier la Porte de Clignancourt à la Porte d'Orléans, la ligne 4 a été l'objet de différents prolongements et d'évolutions. Récemment encore, elle a été prolongée dans la partie sud, avec la création de la station terminus Mairie de Montrouge (fig. 9-1).


*Figure 9-1 : Plan ligne 4 (crédit RATP)*

Actuellement, elle dessert 27 stations, réparties sur 15,4 km, et les projets de prolongement ne sont pas encore terminés, puisque 1,7 km supplémentaires sont en cours de construction vers Bagneux.

On peut donc affirmer que la ligne 4 dispose autant d'ouvrages anciens que de modernes. Notre choix de l'utiliser comme échantillon d'étude n'en est que plus pertinent, puisqu'il nous permet de couvrir l'éventail complet des âges des ouvrages.

## 9.2 *Le recensement d'ouvrages de la ligne 4*

La ligne 4 du métro de Paris présente 15,4 km de parcours complétement souterrain, soit le 5% du total du patrimoine à gérer par la RATP (métro plus RER A et B). Suite au recensement d'ouvrages, nous avons pu dégager la répartition des différents types d'ouvrages composant cette ligne du métro (tableau 9-1 et fig. 9-2).

| Type d'ouvrage | m | % |
|---|---|---|
| Tunnel en maçonnerie | 12 075 | 78 % |
| Tunnel en béton armé | 706 | 5 % |
| Ouvrage spécial en béton armé | 591 | 4% |
| Ouvrage spécial mixte | 751 | 5 % |
| Tranchée couverte en béton armé | 1061 | 7 % |
| Tranchée couverte métallique | 118 | 1 % |

*Tableau 9-1 : Distribution de la ligne 4 par type d'ouvrages (mètres linéaires et pourcentage)*

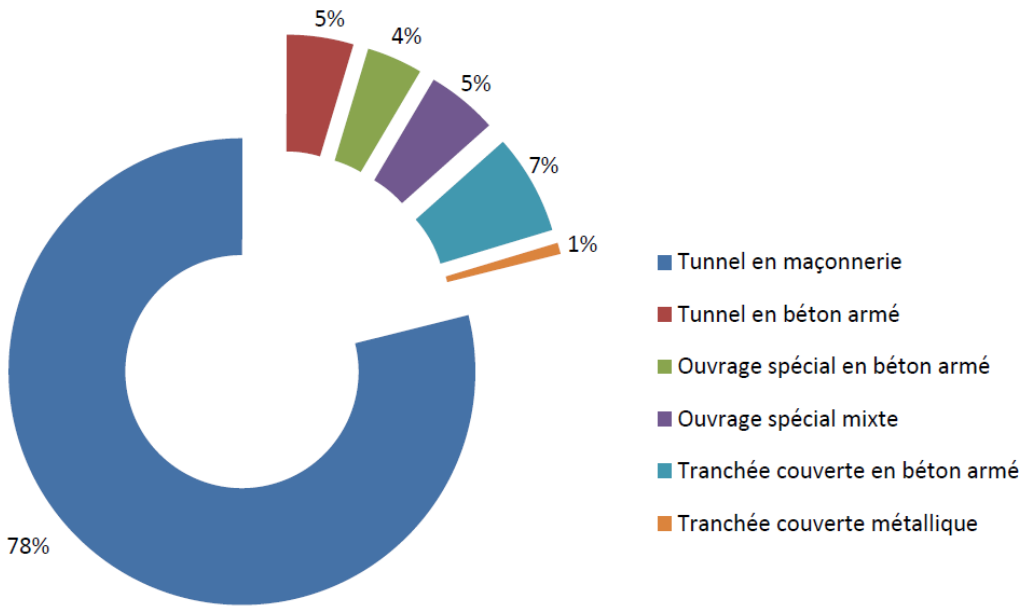



*Figure 9-2 : Distribution de la ligne 4 par type d'ouvrages (pourcentage)*

Les tunnels maçonnés, sur lesquels nous allons développer notre étude, présentent une longueur de 12 km, soit le 78 % de la ligne 4. Dans cette famille d'ouvrages, nous pouvons trouver un large éventail des différents types de tunnels maçonnés : les sections type ordinaires de tunnel à deux voies et de point d'arrêt à deux voies et deux quais latéraux, et les différentes variations, comme des tunnels de à 1, 3 ou 5 voies, etc.

## 9.3 *Le service de la ligne 4*

La ligne 4 transporte 740 000 voyageurs par jour, ce qui fait d'elle la 2ème ligne la plus fréquentée du métro parisien, après la ligne 1. Elle traverse le cœur de Paris, en suivant les grands boulevards de la ville : Magenta, Strasbourg, Saint-Germain… et desserve des quartiers touristiques comme par exemple, l'Île de la Cité (cathédrale de Notre-Dame, la Sainte-Chapelle, etc.), le quartier de Montparnasse, le quartier Latin, la place Denfert-Rochereau (catacombes de Paris), etc.

Au long de son trajet, elle présente des correspondances avec toutes les lignes de métro, différentes lignes de RER et de TGV. Elle desserve plusieurs pôles d'échanges très importants. Parmi lesquels on peut citer la Gare du Nord, une des stations multimodales les plus grandes du monde, où se rejoignent la ligne 5 du métro, cinq lignes de RER et des lignes de TGV internationales ; la Gare de l'Est et de Montparnasse (correspondance avec d'autres lignes de métro et TGV) ; Denfert-Rochereau avec correspondance avec le RER B et la ligne d'Orlybus qui desserve l'aéroport d'Orly, etc.

Dans ce contexte, la ligne 4 est très sollicitée en termes de qualité de service et doit répondre à tout moment aux évolutions de l'exploitation. C'est en partie pourquoi la ligne 4 fait actuellement l'objet d'un projet d'automatisation sans interruption de trafic (lancé depuis 2014), qui lui permettra à terme d'augmenter sa capacité et d'améliorer sa régularité et sa sécurité.

A la lumière de ce qui précède, la ligne 4 se présente actuellement comme une vitrine du développement et du savoir-faire de la RATP. La gestion du patrimoine doit être au service de ces valeurs et assurer que l'état structurel du patrimoine ne soit pas un obstacle pour atteindre ces objectifs. Cette vision de futur concernant la ligne 4 doit être prise en compte dans la définition des programmes de maintenance.

## 9.4 *Configuration géologique*

Du point de vue géologique, la pertinence du choix de la ligne 4 réside dans la diversité des horizons hydrogéologiques qu'elle traverse. En effet, la ligne 4 suit le schéma d'une coupe nord-sud de Paris, et est donc concernée par des natures géologiques variées et assez représentatives du contexte hydrogéologique Parisien.

On peut comprendre tout l'intérêt de ce choix en regardant la carte d'écorché géologique de la région parisienne sur laquelle est dessiné le tracé de la ligne 4 (Lamé, 2013). On voit qu'elle est concernée par de nombreuses formations géologiques et qu'elle traverse la Seine au niveau de l'île de la Cité, ce qui fait d'elle un choix privilégié pour cette thématique (fig. 9-3).

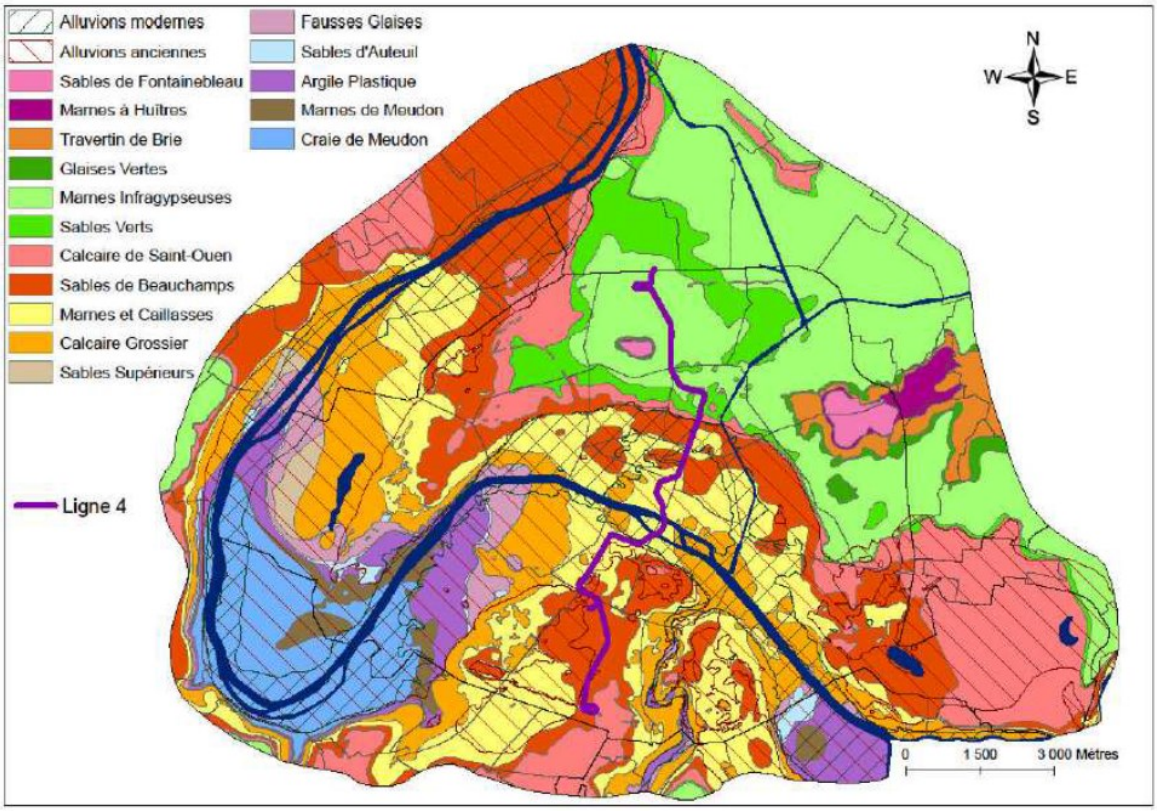



*Figure 9-3 : Carte géologique de Paris avec tracé de la ligne 4 (Lamé, 2013)*

La ligne 4 du métro traverse différentes formations géologiques: les alluvions anciennes, le calcaire de Saint-Ouen, le calcaire grossier, les fausses glaises, les marnes et caillasses, remblais, sables de Beauchamps et sables supérieurs (Zapoff, 2014). Ces formations présentent différents niveaux d'agressivité pour les ouvrages de la RATP. En fonction de leurs caractéristiques, elles peuvent favoriser certains phénomènes, comme par exemple la dissolution du gypse et formation de fontis, les tassements différentiels, attaques sulfatiques, etc. (Lamé, 2013). En outre, les caractéristiques géologiques des terrains traversés exigent l'adaptation des ouvrages. Comme par exemple, dans le cas des tunnels maçonnés, la traversée des terrains instables a été résolue par un renforcement de l'épaisseur des revêtements et par des modifications géométriques du profil type (Biette, 1928).

Le contact des ouvrages avec la nappe phréatique est un autre facteur à prendre en compte vis-à-vis de la dégradation des ouvrages. Par exemple, pour les tunnels en maçonnerie construits selon la méthode franco-belge (§ 1.1.3.3), les zones de battement de nappe s'avèrent comme les plus agressives. En effet, les bois de blindage qui demeurent abandonnés entre le terrain et le revêtement sont sensibles aux variations d'humidité, lesquelles provoquent leur pourrissement et donnent lieu à la création de vides à l'extrados du tunnel. Dans le cas de la ligne 4, 90 % des ouvrages n'ont pas de contact avec la nappe phréatique, 4 % sont immergés totalement et les 6 % restants sont situés dans la zone de battement (fig. 9-4).

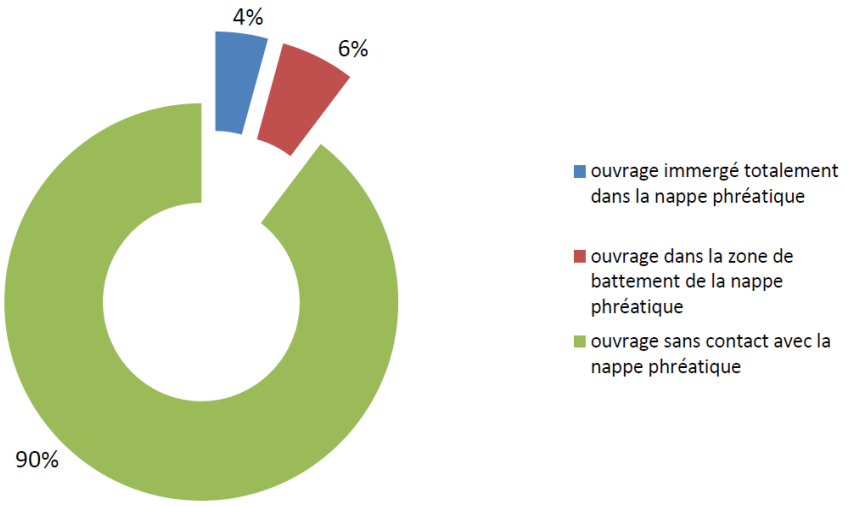



*Figure 9-4 : Distribution des ouvrages de la ligne 4 en fonction de son contact avec la nappe phréatique*

Lorsque le terrain encaissant se trouve baigné par la nappe phréatique, la construction devait se préoccuper non seulement de l'instabilité du sol lorsque celui-ci manque de cohésion, mais encore de l'étanchéité des ouvrages. Le problème de l'étanchéité est difficile à résoudre dans le cas des tunnels maçonnés, car il n'existe pas de maçonnerie rigoureusement étanche. Mais moyennant quelques dispositions spéciales, il est possible de parvenir à des solutions suffisamment satisfaisantes. C'est le cas des sections qui incorporent un double rouleau permettant d'améliorer l'étanchéité des ouvrages et la résistance aux pressions exercées par les eaux dans le cas des tunnels immergés dans la nappe phréatique à des profondeurs considérables (fig. 9-5).

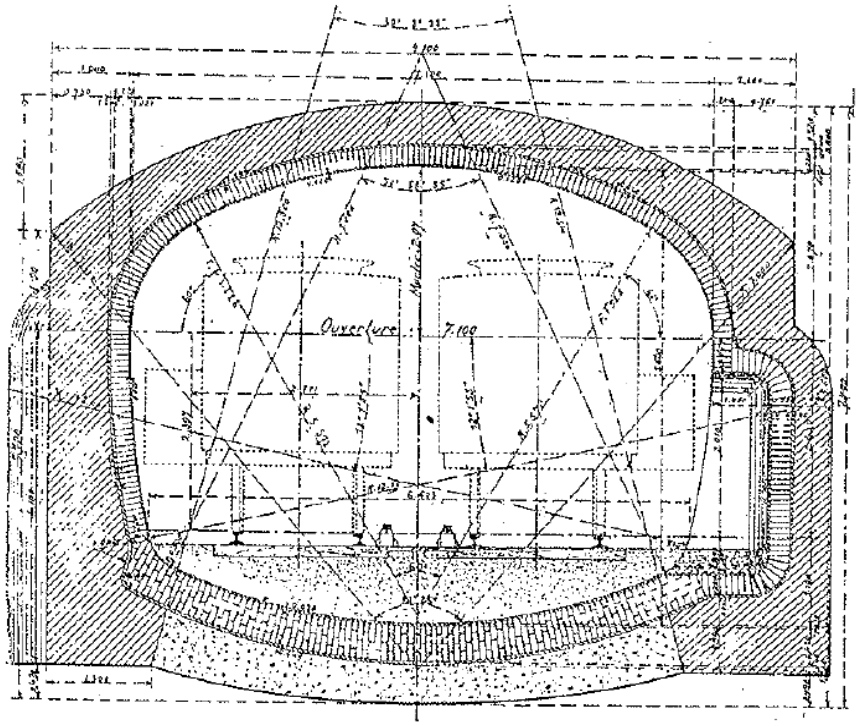



*Figure 9-5 : Tunnel maçonné immergé dans la nappe phréatique : section renforcé à double rouleau (Biette, 1928)*

Grâce à ces adaptations des sections types, il a été possible de s'établir en terrains mouillés avec des souterrains maçonnés. Sauf dans le cas des traversées du lit de la Seine qu'on a dû faire usage de revêtements métalliques. Dans la ligne 4, les traversés sous-fluviales de la Seine ont exigé des constructions d'ouvrages spéciaux entre les stations de Châtelet et Odéon, sur une longueur de 1 200 m environ. Dans cette partie de la ligne, le souterrain a été construit à partir deux méthodes : le fonçage verticale sur caissons métalliques à l'air comprimé (fig. 1-2) et le cheminement horizontal par congélation du sol (fig. 1-3) (Biette, 1928). Ces ouvrages représentent des exemples uniques dans le patrimoine de la RATP. Dans ce contexte, leur fonctionnement et leurs méthodes de maintenance diffèrent du reste d'ouvrages du réseau.

Les carrières souterraines occupent une surface de plus de 10 km² à Paris (Lamé, 2013). La ligne 4 traverse une longueur de plus de 2 000 m de zones de carrières remblayées (Zapoff, 2014) (fig. 9-6)

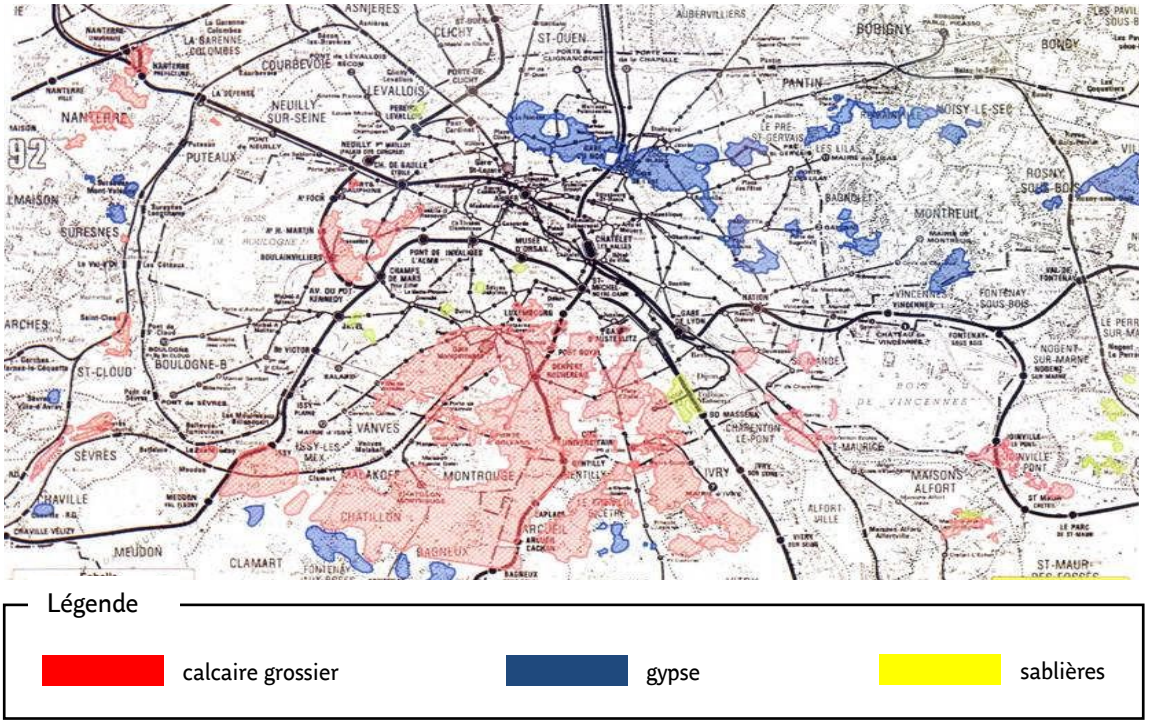



*Figure 9-6 : Zones de carrières à Paris (document interne RATP)*

Les remblais des anciennes exploitations présentent l'inconvénient de ne procurer aux tunnels maçonnés qu'une butée insuffisante. Dans ces conditions, le profil des ouvrages a été adapté par une surépaisseur du revêtement et par un surhaussement donné à la voûte en voue de réduire la poussée (Biette, 1928).

Dans ce contexte hydrogéologique, il a été nécessaire d'adapter le profil des tunnels maçonnés en chaque point aux circonstances résultant de la situation du terrain. Cela a donné lieu à une grande hétérogénéité de sections que nous présentons dans l'Annexe 3. Cette variété d'ouvrages qui se trouvent dans la ligne 4 nous permet de couvrir une grande partie de l'éventail de tunnels maçonnés qui font partie du réseau de la RATP. En outre, cela nous permet d'intégrer dans notre étude le problème de l'hétérogénéité des infrastructures qui doivent être considérées dans une même programmation de travaux de maintenance (ce qui est une des caractéristiques de la gestion patrimoniale).

## 9.5 *Historique des travaux*

Au début des années 1960, l'évolution de l'exploitation a saturé la capacité de service de la ligne 4. Pour régler cette situation, les stations de cette ligne ont été allongées de 75 à 90 m, permettant l'utilisation de trains d'une capacité plus grande. Le trafic de voyageurs de cette ligne n'a pas cessé d'augmenter et actuellement un projet d'automatisation de l'exploitation est mis en place depuis 2014, sans interruption de l'exploitation et sans concerner les infrastructures de génie civil. Par rapport au prolongement de la ligne, un tronçon de 1,7 km est cours de construction vers Bagneux.

Les travaux de régénération des tunnels maçonnés de cette ligne ont débuté en 1974 et ont continué régulièrement selon une moyenne de 3 000 m² par an. Actuellement 88 % de la ligne ont été déjà régénérés (fig. 9-7).

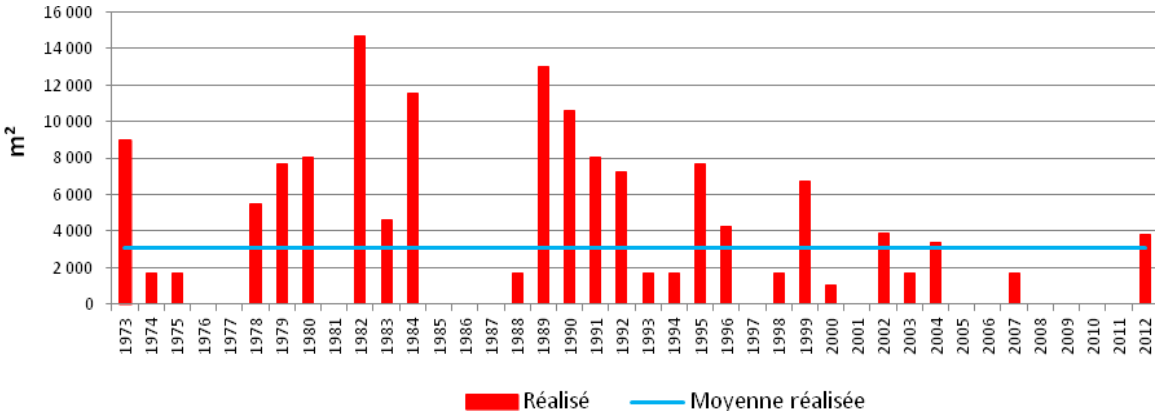



*Figure 9-7 : Historique des travaux de régénération de maçonnerie de la ligne 4*

## 9.6 *Surveillance de l'état structurel*

Les actions de surveillance de cette ligne se basent sur le principe de visites et inspections périodiques que nous avons présenté dans la section 1.2. Ces actions permettent de relever les désordres affectant l'état structurel des ouvrages et de réaliser des recommandations d'intervention.

La figure 9-8 montre la répartition des notes de l'ensemble des procès-verbaux MARION concernant la ligne 4 ; on peut y apprécier une forte concentration de notes 2 et 3 :

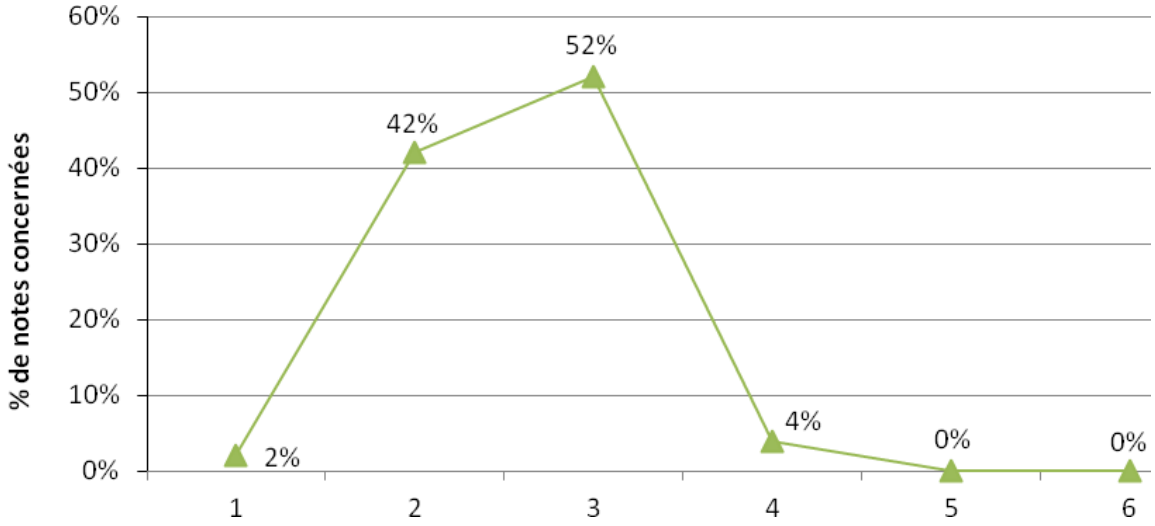



*Figure 9-8 : Répartition des notes des Procès-Verbaux MARION, année 2013 (Mirouze, 2014)*

Pour réaliser notre étude, nous allons nous baser sur les propositions de gros entretien (PGE) réalisées en 2014 sur la ligne 4 du métro de Paris (tableau 9-2) :

**Propositions de Gros Entretien (PGE)**

| Ouvrage | | Type de travaux |
|---|---|---|
| TU010 | Porte de Clignancourt | Régénération maçonnerie |
| TU010 | Château Rouge / Barbes - Rochechouart | Régénération maçonnerie |
| TU010 | Château Rouge / Barbes - Rochechouart | Réfection d'enduit |
| TU010 | Barbes - Rochechouart | Réfection d'enduit |
| TU010 | Barbes - Rochechouart | Régénération maçonnerie |
| TU010 | Barbes - Rochechouart / Gare du Nord | Régénération maçonnerie |
| TU010 | Gare du Nord / Gare de l'Est | Régénération maçonnerie |
| TU010 | Gare de l'Est | Régénération maçonnerie |
| TU030 | Gare de l'Est | Régénération maçonnerie |
| TU010 | Strasbourg Saint Denis / Réaumur-Sébastopol | Régénération maçonnerie |
| TU010 | Strasbourg Saint Denis / Réaumur-Sébastopol | Réfection d'enduit |
| TU010 | Etienne Marcel / Les Halles | Réfection d'enduit |
| TU040 | Etienne Marcel / Les Halles | Réfection d'enduit |
| TU041 | Etienne Marcel / Les Halles | Réfection d'enduit |
| TU010 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit |
| TU010 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie |
| TU050 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit |
| TU050 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie |
| TU060 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit |
| TU060 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie |
| TU070 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit |
| TU070 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie |
| TU010 | Saint Sulpice / Saint Placide | Régénération maçonnerie |
| TU010 | Saint Sulpice / Saint Placide | Réfection d'enduit |
| TU010 | Vavin / Raspail | Réfection d'enduit |
| TU010 | Raspail / Denfert Rochereau | Réfection d'enduit |

*Tableau 9-2 : Liste de PGE concernant la ligne 4 : année 2014*

## 9.7 *Synthèse*

Nous avons présenté les caractéristiques de la ligne 4 du métro de Paris. Nous nous baserons sur ce cas réel pour construire notre outil d'aide à la gestion du patrimoine de la RATP et pour tester sa pertinence.

La ligne 4 est une des plus anciennes du réseau et actuellement un projet de prolongement est en cours de construction vers Bagneux. Dans ce contexte, le choix de la ligne 4 comme cas d'étude nous fournit un échantillon représentatif du réseau RATP. Dans cette ligne nous trouvons des exemples des ouvrages des plus anciens et ceux de construction récente. De cette manière, nous pourrons couvrir l'éventail complet des âges des ouvrages du réseau de la RATP dans notre étude.

Nous avons réalisé un recensement des ouvrages de cette ligne, ce qui nous a permis de dégager une répartition des différents types d'ouvrages. Les tunnels maçonnés représentent le 78 % de la longueur totale de cette ligne. Dans cette famille d'ouvrages, nous identifions les sections types du tunnel maçonné (à deux voies pour les interstations, et à deux voies et deux quais latéraux pour les points d'arrêt), ainsi que de différentes largeurs (de 1 à 5 voies).

Cette ligne est la deuxième la plus fréquentée du métro parisien, supportant un trafic de 740 000 voyageurs par jour. Dans son tracé nord-sud, elle traverse le cœur de Paris en desservant des quartiers touristiques et différents pôles d'échange très importants. La ligne 4 présente des correspondances avec toutes les lignes de métro, différentes ligne de RER et gares de TGV. Les interactions de la ligne 4 avec le reste du réseau de transports de la RATP et de la ville de Paris sont nombreuses. Dans ce contexte, le fonctionnement de la ligne 4 est essentiel pour assurer un bon fonctionnement du reste de réseau RATP.

Sous l'angle de la géologie, la ligne 4 traverse des horizons hydrogéologiques variés et assez représentatifs du contexte hydrogéologique de Paris. Au long du tracé de cette ligne, nous trouvons des formations géologiques présentant des différents niveaux d'agressivité pour les tunnels maçonnés de la RATP. Cette diversité hydrogéologique de l'environnement présente un avantage double : d'un côté, elle nous permet d'identifier les différents phénomènes qui peuvent se développer, en dégradant les ouvrages de la RATP (dissolution du gypse, formation de fontis, attaques sulfatiques, etc.) ; d'un autre côté, nous trouvons les différents types de tunnels maçonnés qui ont été modifiés pour s'adapter à chaque contexte de leur environnement.

Nous avons présenté l'historique des travaux de réhabilitation suivis par les tunnels maçonnés de cette ligne. Les premiers ouvrages ont été réhabilités en 1973 et actuellement 88 % des ouvrages ont été déjà traités. La ligne 4 nous offre des exemples de tous les cas possibles en ce qui concerne l'historique des régénérations, où nous trouvons des ouvrages qui ont été régénérés il y a plus de 40 ans, des ouvrages récemment régénérés et des ouvrages qui n'ont jamais été régénérés.

Néanmoins, le fait de ne considérer qu'une seule ligne dans notre cas d'étude présente des inconvénients. Par exemple, la ligne 4 est concernée dans sa totalité par les travaux d'automatisation de l'exploitation. Dans ce contexte, tous les ouvrages présentent la même importance selon ce point de vue, ce qui ne permet pas d'établir une hiérarchisation des ouvrages au sein de la ligne selon cet aspect. Cet inconvénient se produit également au moment d'analyser le trafic de voyageurs car nous avons décidé de considérer les données de trafic à l'échelle de la ligne et pas à l'échelle des ouvrages (§ 7.2.2.1). Selon ces aspects, la ligne 4 n'est pas représentative des différents cas qu'on peut trouver dans le réseau de la RATP. Néanmoins, ces inconvénients disparaitraient lorsque l'analyse est réalisée à l'échelle globale du patrimoine RATP, ce qui sera le cas de notre outil une fois qu'il soit complètement opérationnel.

# Chapitre 10. Résultats et discussions

Ce chapitre présente l'application de notre outil multicritère d'aide à la gestion patrimoniale à la ligne 4 du métro de Paris afin de tester sa capacité à proposer des programmations de travaux de maintenance. L'outil est mis en œuvre sur les propositions de gros entretien (PGE) en cours qui concernent cette ligne et qui sont enregistrées dans la base de données MARION.

Le détail des formulations mathématiques des méthodes ELECTRE TRI et ELECTRE III n'est pas présenté dans ce chapitre (il est disponible en Annexe 10). Nous expliquons uniquement la valorisation des paramètres qui interviennent dans ces méthodes et réalisons une analyse des résultats obtenus.

## 10.1 *Application de l'outil multicritère d'aide à la gestion patrimoniale sur la ligne 4 du métro de Paris*

Nous partons des demandes de PGE établies en cours de l'année 2014 et enregistrées dans la base de données MARION. Ces demandes sont réalisées par les visiteurs comme résultats des actions de surveillance.

Notre ensemble d'actions *A* est composé par 26 actions. Le tableau 10-1 détaille l'ouvrage et le type de travaux concernés par chaque PGE.

**Action**

| Code | Ouvrage | | Type de travaux |
|---|---|---|---|
| a1 | TU010 | Porte de Clignancourt | Régénération maçonnerie |
| a2 | TU010 | Château Rouge / Barbes - Rochechouart | Régénération maçonnerie |
| a3 | TU010 | Château Rouge / Barbes - Rochechouart | Réfection d'enduit |
| a4 | TU010 | Barbes - Rochechouart | Réfection d'enduit |
| a5 | TU010 | Barbes - Rochechouart | Régénération maçonnerie |
| a6 | TU010 | Barbes - Rochechouart / Gare du Nord | Régénération maçonnerie |
| a7 | TU010 | Gare du Nord / Gare de l'Est | Régénération maçonnerie |
| a8 | TU010 | Gare de l'Est | Régénération maçonnerie |
| a9 | TU030 | Gare de l'Est | Régénération maçonnerie |
| a10 | TU010 | Strasbourg Saint Denis / Réaumur-Sébastopol | Régénération maçonnerie |
| a11 | TU010 | Strasbourg Saint Denis / Réaumur-Sébastopol | Réfection d'enduit |
| a12 | TU010 | Etienne Marcel / Les Halles | Réfection d'enduit |
| a13 | TU040 | Etienne Marcel / Les Halles | Réfection d'enduit |
| a14 | TU041 | Etienne Marcel / Les Halles | Réfection d'enduit |
| a15 | TU010 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit |
| a16 | TU010 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie |
| a17 | TU050 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit |
| a18 | TU050 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie |
| a19 | TU060 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit |
| a20 | TU060 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie |
| a21 | TU070 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit |
| a22 | TU070 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie |
| a23 | TU010 | Saint Sulpice / Saint Placide | Régénération maçonnerie |
| a24 | TU010 | Saint Sulpice / Saint Placide | Réfection d'enduit |
| a25 | TU010 | Vavin / Raspail | Réfection d'enduit |
| a26 | TU010 | Raspail / Denfert Rochereau | Réfection d'enduit |

*Tableau 10-1 : Liste de PGE de la ligne 4*

### 10.1.1 Etape 1 : Gestion à long terme

Cette première étape vise à fournir aux gestionnaires de la RATP une vision à long terme de la gestion et à proposer un ordre de grandeur des budgets nécessaires, permettant d'anticiper les besoins futurs. Pour ce faire, les PGE doivent être classées en catégories de priorité (§ 8.1).

***Données de départ***

Comme point de départ de nos calculs, nous avons évalué toutes les PGE selon les critères *C1 :* ***performance****, C2 :* ***impact de la défaillance*** et *C3* ***: opportunité de travaux*** (tableau 10-2) :

| Action Code | Ouvrage | | Type de travaux | C1 | C2 | C3 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| a1 | TU010 | Porte de Clignancourt | Régénération maçonnerie | 28 | 3 | 6 |
| a2 | TU010 | Château Rouge / Barbes - Rochechouart | Régénération maçonnerie | 32 | 3 | 6 |
| a3 | TU010 | Château Rouge / Barbes - Rochechouart | Réfection d'enduit | 32 | 3 | 6 |
| a4 | TU010 | Barbes - Rochechouart | Réfection d'enduit | 31 | 2 | 6 |
| a5 | TU010 | Barbes - Rochechouart | Régénération maçonnerie | 31 | 2 | 6 |
| a6 | TU010 | Barbes - Rochechouart / Gare du Nord | Régénération maçonnerie | 38 | 2 | 6 |
| a7 | TU010 | Gare du Nord / Gare de l'Est | Régénération maçonnerie | 21 | 2 | 6 |
| a8 | TU010 | Gare de l'Est | Régénération maçonnerie | 33 | 4 | 6 |
| a9 | TU030 | Gare de l'Est | Régénération maçonnerie | 17 | 3 | 6 |
| a10 | TU010 | Strasbourg Saint Denis / Réaumur-Sébastopol | Régénération maçonnerie | 17 | 3 | 6 |
| a11 | TU010 | Strasbourg Saint Denis / Réaumur-Sébastopol | Réfection d'enduit | 17 | 3 | 6 |
| a12 | TU010 | Etienne Marcel / Les Halles | Réfection d'enduit | 22 | 3 | 6 |
| a13 | TU040 | Etienne Marcel / Les Halles | Réfection d'enduit | 21 | 3 | 6 |
| a14 | TU041 | Etienne Marcel / Les Halles | Réfection d'enduit | 22 | 3 | 6 |
| a15 | TU010 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit | 26 | 2 | 6 |
| a16 | TU010 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie | 26 | 2 | 6 |
| a17 | TU050 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit | 26 | 2 | 6 |
| a18 | TU050 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie | 26 | 2 | 6 |
| a19 | TU060 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit | 27 | 3 | 6 |
| a20 | TU060 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie | 27 | 3 | 6 |
| a21 | TU070 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit | 26 | 3 | 6 |
| a22 | TU070 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie | 26 | 3 | 6 |
| a23 | TU010 | Saint Sulpice / Saint Placide | Régénération maçonnerie | 30 | 3 | 6 |
| a24 | TU010 | Saint Sulpice / Saint Placide | Réfection d'enduit | 30 | 3 | 6 |
| a25 | TU010 | Vavin / Raspail | Réfection d'enduit | 26 | 3 | 6 |
| a26 | TU010 | Raspail / Denfert Rochereau | Réfection d'enduit | 14 | 2 | 6 |

*Tableau 10-2 : Evaluation des PGE selon les critères C1 « **performance** », C2 « **impact de la défaillance** » et C3 « **opportunité de travaux** » (Etape 1).*

***Définition du seuil de coupure λ***

Le seuil de coupure $\lambda$ est une valeur utilisée par la méthode ELECTRE TRI comme référence pour comparer l'indice de crédibilité $\sigma_S(a, b_h)$ et valider l'assertion « $a\ S\ b_h$ » (l'action $a$ surclasse le seuil de référence $b_h$) tel que : $\sigma_S(a, b_h) \geq \lambda$, $0 \leq \lambda \leq 1$ (Annexe 10).

Ce seuil $\lambda$ est défini par les gestionnaires. Une valeur de $\lambda$ choisie proche de 1 correspond à renforcer la majorité requise des critères qui sont favorables à l'assertion « $a\ S\ b_h$ » pour accepter que l'action $a$ surclasse le seuil de référence $b_h$. Néanmoins, ces valeurs élevées de $\lambda$ peuvent conduire à ce que l'affectation par ELECTRE TRI pessimiste diffère de celle par ELECTRE TRI optimiste, ce qui équivaudrait à considérer que l'action $a$ et les seuils de référence $b_i$ sont incomparables. Dans ce cas, une réduction progressive de $\lambda$ conduit à diminuer l'écart entre les affectations pessimiste et optimiste jusqu'à les faire coïncider. Nous rappelons que réduire en excès le seuil de coupe $\lambda$ impliquerait l'acceptation de valeurs de l'indice de crédibilité $\sigma_S(a, b)$ plus proches de 0 (dans ce cas, l'affirmation de l'action $a$ surclasse le seuil de référence $b_h$ n'aurait pas de fondement) (Annexe 2).

L'ajustement du seuil de coupe $\lambda$ permet donc de durcir ou d'assouplir les conditions de surclassement. Dans notre cas, une valeur de $\lambda = 0.65$ nous permet d'obtenir que les affectations pessimistes et optimistes coïncident pour toutes les actions (fig. 10-1).

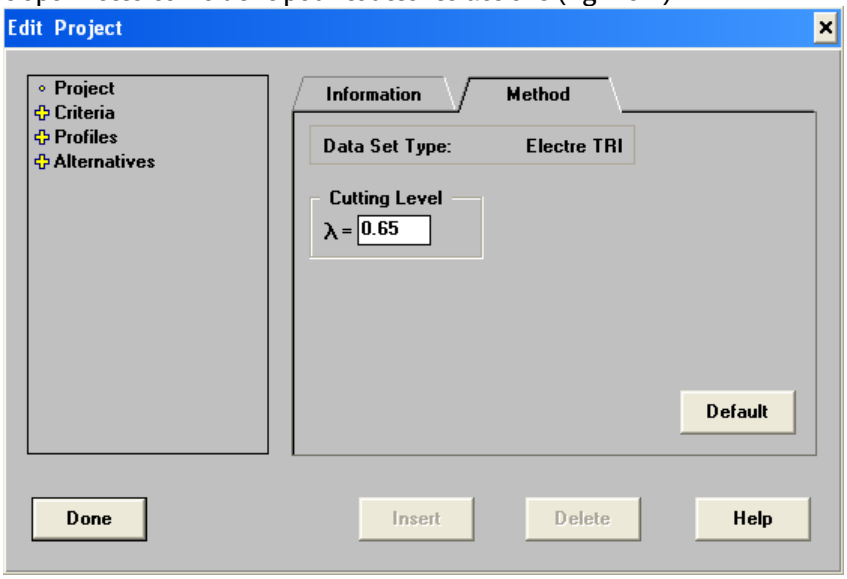



*Figure 10-1 : Définition du seuil de coupure $\lambda$ de la méthode ELECTRE TRI. (Interface du logiciel développé par l'Université Dauphine)*

***Définition des seuils de référence $b_h$***

Les seuils de référence $b_h$ déterminent les limites entre les différentes catégories de priorité. Pour obtenir 4 catégories de priorité, nous avons défini 5 seuils de référence $b_0$, $b_1$, $b_2$, $b$, et $b_4$ (fig. 10-2) :

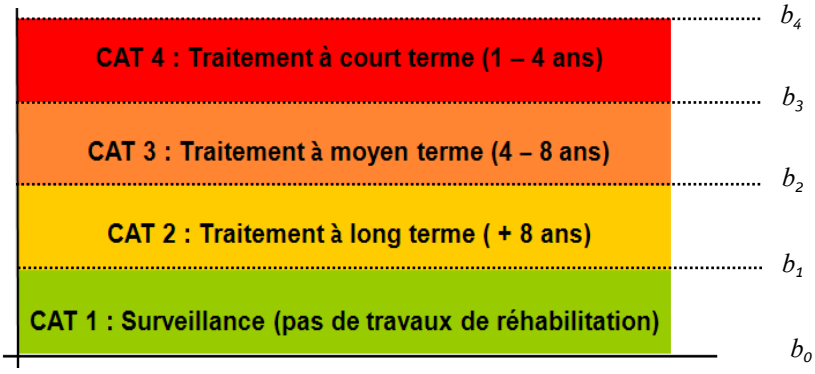



*Figure 10-2 : Définition des seuils délimitant les catégories de priorité*

Les valeurs de ces seuils sont déterminées par les experts. Dans notre cas, nous avons attribué les valeurs suivantes (tableau 10-3) :

| Seuil | C1 | C2 | C3 |
|---|---|---|---|
| *b0* | 3* | 0 | 0 |
| *b1* | 14,8 | 2,5 | 2,5 |
| *b2* | 22,5 | 3,5 | 3,5 |
| *b3* | 30,3 | 4,5 | 4,5 |
| *b4* | 56 | 7 | 7 |

**NOTA : la valeur attribuée au seuil $b_0$ selon le critère C1 est égale à 3 car elle est la valeur minimale que peut adopter une évaluation de performance (voir construction du critère « performance », Annexe 8).*

*Tableau 10-3 : Définition des valeurs des seuils de référence $b_h$*

Ces données sont introduites dans le logiciel ELECTRE TRI développé par l'université Paris Dauphine dont l'interface est représentée dans la figure 10-3 :

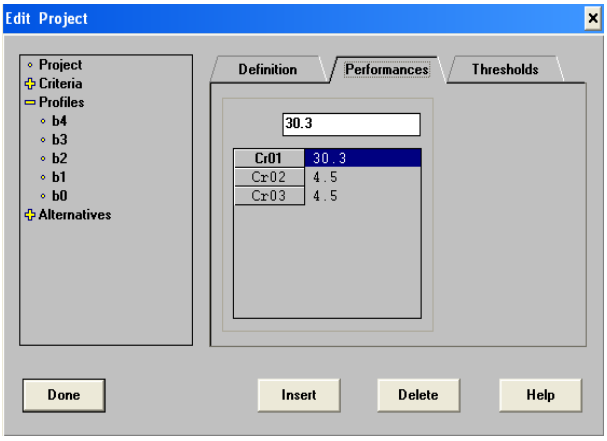



*Figure 10-3 : Définition du seuil de référence $b_3$ (Interface du logiciel développé par l'Université Dauphine)*

***Définition des seuils d'indifférence et de préférence***

L'utilisation de *pseudo-critères* nous permet d'introduire le *seuil d'indifférence* « $q_j$ » et le *seuil de préférence* « $p_j$ » dans la comparaison de deux actions. Le seuil d'indifférence $q_j$ correspond à l'écart maximal de performance entre deux actions compatibles avec une situation d'indifférence (les deux actions seraient équivalentes pour le décideur). Le seuil de préférence $p_j$ correspond à l'écart de performance entre deux actions à partir duquel le décideur préfère strictement l'action présentant la meilleure performance (§ 5.4.2).

Dans notre problématique, le seul pseudo-critère de notre famille de critères est la « ***performance*** ». Comme nous l'avons précisé lors de sa construction (§ 7.1), les simplifications que nous avons adoptées et la variabilité des données intervenant dans ce critère (notes MARION) font que les évaluations de performance qu'on obtient ne peuvent pas être regardées comme indiscutables. Ces limitations sont prises en compte grâce aux seuils d'indifférence et de préférence.

Dans un souci de simplifier notre méthodologie, les gestionnaires de la RATP ont considéré convenable d'utiliser uniquement le *seuil d'indifférence* « $q_j$ » pour le *pseudo-critère* « ***performance*** ». Pour ce faire, il suffit d'attribuer la même valeur aux seuils d'inférence « $q_1$ » et de préférence « $p_1$ » ($q_1 = p_1$) (fig. 10-4) :

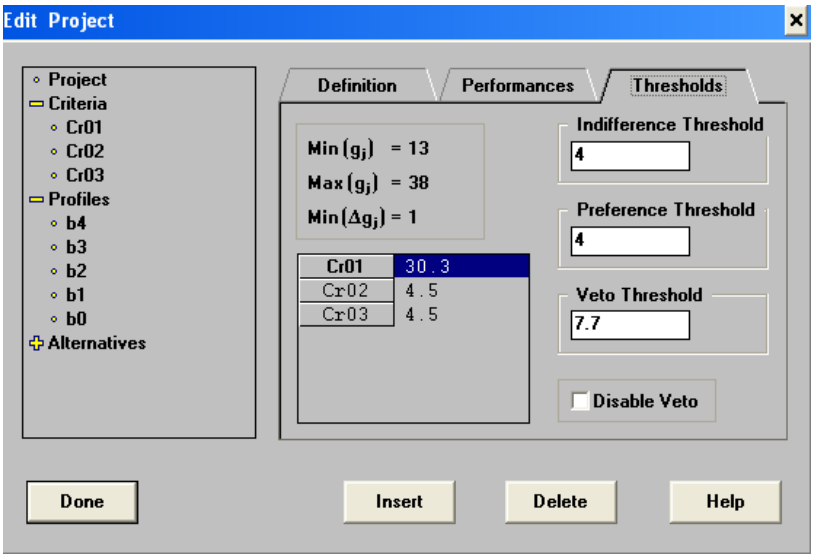



*Figure 10-4 : Définition des seuils d'indifférence ($q_i$), préférence ($p_i$) et de veto ($v_i$) (Interface du logiciel développé par l'Université Dauphine)*

Pour établir la valeur du seuil d'indifférence « $q_1$» pour la « ***performance*** » nous nous basons sur le nombre de fois où la note MARION intervient dans la construction de ce pseudo-critère (Annexe 8). Nous rappelons que la note MARION est attribuée par les visiteurs d'ouvrages d'art comme résultat des activités de surveillance visuelle. Cette notation dépend donc de leur analyse personnelle et on considère sa variabilité limitée à ± 1 point. En effet, lors du relevé des désordres, les visiteurs peuvent hésiter au moment d'attribuer une note, par exemple entre 2 et 3, ou entre 3 et 4 ; toutefois, l'amplitude d'hésitation n'est quasiment jamais supérieure à 1.

Dans la construction du pseudo-critère « ***performance*** » la note MARION intervient quatre fois (Annexe 8), et donc la variabilité de la « ***performance*** » peut être de ± 4 points. Dans nos calculs, les gestionnaires de la RATP ont décidé d'assigner au seuil d'indifférence une valeur égale à 4 ($q_1 = 4 = p_1$) (fig. 10-4).

Pour le reste des critères, considérés comme des vrais-critères (§ 7.2), les seuils d'indifférence et de préférence n'interviennent pas. Dans ce cas, il suffit d'attribuer la valeur 0 au reste de cas pour annuler l'effet de ces seuils.

***Définition du seuil de veto***

Pour attribuer des valeurs de veto « $v_i$ », il convient tout d'abord de se demander, pour chaque critère, si, compte-tenu de sa nature et de l'importance qui lui est accordée, on juge souhaitable ou convenable d'attribuer à un critère le pouvoir de s'opposer à un surclassement unanime de la part des autres critères (Roy et Bouyssou, 1993). Les gestionnaires de la RATP considèrent la sécurité des infrastructures comme l'aspect le plus important que doit assurer la gestion du patrimoine. Dans ce cas, on a accordé à la « ***performance*** » le pouvoir de veto.

La valeur numérique du seuil de veto peut être affectée de façon pragmatique en tenant compte de l'importance relative des critères, de la répartition des évaluations sur les critères, de l'amplitude des divers seuils de préférence et de ce que l'on peut savoir du système de valeurs du décideur. La prise en compte de ces facteurs laisse subsister une part d'arbitraire dans le choix des valeurs numériques pour les seuils de veto (Roy et Bouyssou, 1993).

Dans notre cas, on exige que les actions présentant une situation intolérable (comme par exemple, un désordre d'infiltration affectant les rails de traction électrifiés (cf. Annexe 8)) soient automatiquement affectées à la catégorie la plus prioritaire (CAT 4) indépendamment des

évaluations du reste de critères. Nous rappelons que le veto est déclenché dès que la différence entre les évaluations de deux actions sur un critère *i* dépasse une certaine valeur ($g_i(a) - g_i(b_h) \geq v_i$), quelles que soient les performances de *a* et $b_3$ sur tous les autres critères. Il s'agit donc de définir une valeur numérique ($\mathrm{v}_1$) à partir de laquelle une différence entre la « ***performance*** » de l'action *a* et la « ***performance*** » du seuil de référence $b_3$ est suffisamment importante pour affecter l'action *a* dans la CAT 4, même si les critères restants proposent une affectation différente.

Pour ce faire, nous tenons compte de la répartition des évaluations des actions sur la « ***performance*** ». Les évaluations de « ***performance*** » réalisées sur la ligne 4 nous montrent que la valeur la plus élevée est attribuée à l'action $a_6$, pour laquelle $C_1(a_6) = 38$.

Le seuil de référence $b_3$ est établie à la valeur $C_1(b_3) = 30{,}3$. Dans ce cas, la différence la plus grande qu'on peut trouver entre une action de la ligne 4 et le seuil de référence $b_3$ serait égale à $38 - 30{,}3 = \mathbf{7{,}7}$. Nous proposons donc d'attribuer cette valeur à notre seuil de veto $\mathrm{v}_1 = 7{,}7$ (fig. 10-4).

Nous rappelons que pour la construction du *pseudo-critère* « ***performance*** » (Annexe 8) nous avons prévu l'attribution de la note maximale de « ***performance*** » aux actions qui présentent une situation intolérable ($C_1(a) = 56$). Dans ce cas, la différence entre ces actions et le seuil de référence $b_3$ dépasse largement le seuil de veto
$(g_1(a) - g_1(b_3) = 56 - 30{,}3 = \mathbf{25{,}7}) \geq (v_1 = \mathbf{7{,}7})$, ce qui assure que ce type d'actions est vraiment affecté à la catégorie la plus prioritaire (CAT 4).

***Résultats***

Ces données sont introduites dans le logiciel ELECTRE TRI développé par l'Université Paris Dauphine. La méthodologie ELECTRE TRI permet d'affecter les PGE dans les différentes catégories de priorité. Les résultats sont présentés dans le tableau 10-4 et tableau 10-5 :

| Action | | | | Pessimiste | Optimiste | CATEGORIE |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Code | Ouvrage | | Type de travaux | | | |
| a2 | TU010 | Château Rouge / Barbes - Rochechouart | Régénération maçonnerie | CAT 4 | CAT 4 | 4 |
| a3 | TU010 | Château Rouge / Barbes - Rochechouart | Réfection d'enduit | CAT 4 | CAT 4 | 4 |
| a4 | TU010 | BARBES – ROCHECHOUART | Réfection d'enduit | CAT 4 | CAT 4 | 4 |
| a5 | TU010 | BARBES – ROCHECHOUART | Régénération maçonnerie | CAT 4 | CAT 4 | 4 |
| a6 | TU010 | Barbes - Rochechouart / Gare du Nord | Régénération maçonnerie | CAT 4 | CAT 4 | 4 |
| a8 | TU010 | GARE DE L'EST | Régénération maçonnerie | CAT 4 | CAT 4 | 4 |
| a23 | TU010 | Saint Sulpice / Saint Placide | Régénération maçonnerie | CAT 4 | CAT 4 | 4 |
| a24 | TU010 | Saint Sulpice / Saint Placide | Réfection d'enduit | CAT 4 | CAT 4 | 4 |
| a1 | TU010 | PORTE DE CLIGNANCOURT | Régénération maçonnerie | CAT 3 | CAT 3 | 3 |
| a7 | TU010 | Gare du Nord / Gare de l'Est | Régénération maçonnerie | CAT 3 | CAT 3 | 3 |
| a12 | TU010 | Etienne Marcel / Les Halles | Réfection d'enduit | CAT 3 | CAT 3 | 3 |
| a13 | TU040 | Etienne Marcel / Les Halles | Réfection d'enduit | CAT 3 | CAT 3 | 3 |
| a14 | TU041 | Etienne Marcel / Les Halles | Réfection d'enduit | CAT 3 | CAT 3 | 3 |
| a15 | TU010 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit | CAT 3 | CAT 3 | 3 |
| a16 | TU010 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie | CAT 3 | CAT 3 | 3 |
| a17 | TU050 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit | CAT 3 | CAT 3 | 3 |
| a18 | TU050 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie | CAT 3 | CAT 3 | 3 |
| a19 | TU060 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit | CAT 3 | CAT 3 | 3 |
| a20 | TU060 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie | CAT 3 | CAT 3 | 3 |
| a21 | TU070 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit | CAT 3 | CAT 3 | 3 |
| a22 | TU070 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie | CAT 3 | CAT 3 | 3 |
| a25 | TU010 | Vavin / Raspail | Réfection d'enduit | CAT 3 | CAT 3 | 3 |
| a10 | TU010 | Strasbourg Saint Denis / Réaumur-Sébastopol | Régénération maçonnerie | CAT 2 | CAT 2 | 2 |
| a11 | TU010 | Strasbourg Saint Denis / Réaumur-Sébastopol | Réfection d'enduit | CAT 2 | CAT 2 | 2 |
| a9 | TU030 | GARE DE L'EST | Régénération maçonnerie | CAT 2 | CAT 2 | 2 |
| a26 | TU010 | Raspail / Denfert Rochereau | Réfection d'enduit | CAT 2 | CAT 2 | 2 |

*Tableau 10-4 : Résultats de la méthode ELECTRE TRI : classement des PGE par catégories de priorité*

Les ouvrages qui ne se sont pas concernés par une PGE sont considérés comme faisant partie de la CAT 1 ; aucune action de réhabilitation n'est requise. De cette façon on peut synthétiser les résultats dans le tableau 10-5 :

| Catégorie | Nombre d'ouvrages | Priorité |
|---|---|---|
| CAT 4 | 8 | Travaux de réhabilitation entre 1 et 4 ans |
| CAT 3 | 14 | Travaux de réhabilitation entre 4 et 8 ans |
| CAT 2 | 4 | Travaux de réhabilitation +8 ans |
| CAT 1 | 40 | Surveillance (sans travaux de réhabilitation) |

*Tableau 10-5 : Synthèse du classement des PGE par catégories de priorité*

La figure 10-5 représente la distribution du classement des ouvrages de la ligne 4 du métro parisien :

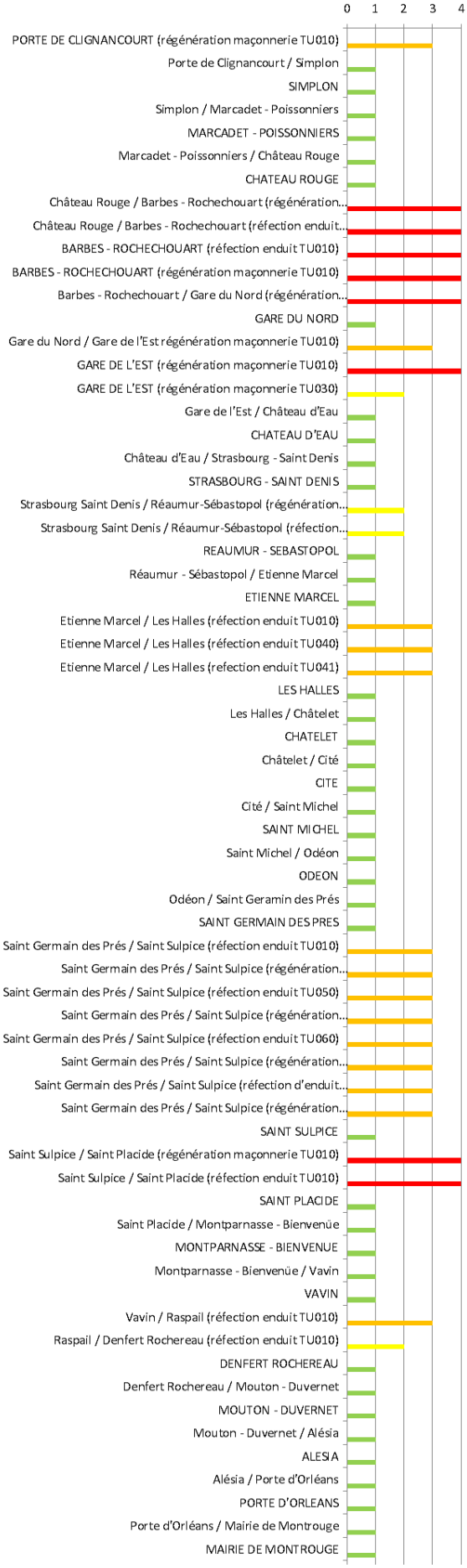



*Figure 10-5 : Représentation du classement des PGE concernant la ligne 4 du métro de Paris*

A partir de ces résultats, nous pouvons associer un coût unitaire à chaque action (tableau 10-6) et proposer ainsi un ordre de grandeur des budgets nécessaires (tableau 10-7) :

| Catégorie | Action | | | | Surface à traiter (m²) | Prix unitaire (€/m²) | Coût (€) | Coût total (€) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Code | Ouvrage | | Type de travaux | | | | |
| CAT 4 | a2 | TU010 | Château Rouge / Barbes - Rochechouart | Régénération maçonnerie | 2 138 | 255 | 545 063 | 3 877 969 |
| CAT 4 | a3 | TU010 | Château Rouge / Barbes - Rochechouart | Réfection d'enduit | 1 151 | 270 | 310 635 | |
| CAT 4 | a4 | TU010 | BARBES – ROCHECHOUART | Réfection d'enduit | 990 | 270 | 267 300 | |
| CAT 4 | a5 | TU010 | BARBES – ROCHECHOUART | Régénération maçonnerie | 1 710 | 255 | 436 050 | |
| CAT 4 | a6 | TU010 | Barbes - Rochechouart / Gare du Nord | Régénération maçonnerie | 3 064 | 255 | 781 256 | |
| CAT 4 | a8 | TU010 | GARE DE L'EST | Régénération maçonnerie | 665 | 255 | 169 575 | |
| CAT 4 | a23 | TU010 | Saint Sulpice / Saint Placide | Régénération maçonnerie | 3 078 | 255 | 784 890 | |
| CAT 4 | a24 | TU010 | Saint Sulpice / Saint Placide | Réfection d'enduit | 2 160 | 270 | 583 200 | |
| CAT 3 | a1 | TU010 | PORTE DE CLIGNANCOURT | Régénération maçonnerie | 87 | 255 | 22 185 | 1 656 877 |
| CAT 3 | a7 | TU010 | Gare du Nord / Gare de l'Est | Régénération maçonnerie | 4 275 | 255 | 1 090 125 | |
| CAT 3 | a12 | TU010 | Etienne Marcel / Les Halles | Réfection d'enduit | 767 | 270 | 207 090 | |
| CAT 3 | a13 | TU040 | Etienne Marcel / Les Halles | Réfection d'enduit | 808 | 270 | 218 071 | |
| CAT 3 | a14 | TU041 | Etienne Marcel / Les Halles | Réfection d'enduit | 400 | 270 | 108 000 | |
| CAT 3 | a15 | TU010 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit | 614 | 270 | 165 672 | |
| CAT 3 | a16 | TU010 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie | 1 140 | 255 | 290 700 | |
| CAT 3 | a17 | TU050 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit | 153 | 270 | 41 418 | |
| CAT 3 | a18 | TU050 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie | 285 | 255 | 72 675 | |
| CAT 3 | a19 | TU060 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit | 400 | 270 | 108 000 | |
| CAT 3 | a20 | TU060 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie | 880 | 255 | 224 400 | |
| CAT 3 | a21 | TU070 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit | 107 | 270 | 28 993 | |
| CAT 3 | a22 | TU070 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie | 200 | 255 | 50 873 | |
| CAT 3 | a25 | TU010 | Vavin / Raspail | Réfection d'enduit | 440 | 270 | 118 800 | |
| CAT 2 | a10 | TU010 | Strasbourg Saint Denis / Réaumur-Sébastopol | Régénération maçonnerie | 875 | 255 | 223 125 | 1 555 925 |
| CAT 2 | a11 | TU010 | Strasbourg Saint Denis / Réaumur-Sébastopol | Réfection d'enduit | 875 | 270 | 236 250 | |
| CAT 2 | a9 | TU030 | GARE DE L'EST | Régénération maçonnerie | 570 | 255 | 145 350 | |
| CAT 2 | a26 | TU010 | Raspail / Denfert Rochereau | Réfection d'enduit | 3 360 | 270 | 907 200 | |

*Tableau 10-6 : Investissements par catégorie de priorité (ligne 4 du métro de Paris)*

| | | |
|---|---|---|
| CAT 4 | Travaux de réhabilitation entre **1 et 4 ans** | **3 877 969 €** |
| CAT 3 | Travaux de réhabilitation entre **4 et 8 ans** | **1 656 877 €** |
| CAT 2 | Travaux de réhabilitation **+8 ans** | **1 555 925 €** |
| CAT1 | Surveillance (sans travaux de réhabilitation) | |

*Tableau 10-7 : Synthèse des investissements par catégorie de priorité (ligne 4 du métro de Paris)*

### 10.1.2 Etape 2 : Gestion à court terme

Les résultats obtenus dans l'étape précédente ne sont pas assez fins pour élaborer une programmation optimisée des travaux de maintenance. Une fois les PGE classées dans des catégories de priorité, nous proposons d'établir une hiérarchisation des ouvrages selon un ordre décroissant de priorité. Ce rangement des ouvrages en fonction de leur priorité sera la base pour définir une programmation optimisée des travaux de maintenance.

***Données de départ***

Dans cette étape, nous sommes confrontés à un problème de rangement (P.γ). La méthode multicritère utilisée est ELECTRE III et la famille de critères est composée par :
*C1 : « **performance** », C2 : « **impact de la défaillance** », C3 : « **opportunité de travaux** »* et *C4 : « **groupement de travaux** ».*

Le tableau 10-8 représente l'évaluation des actions selon cette famille de critères :

| Catégorie | Action | | | | C1 | C2 | C3 | C4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Code | Ouvrage | | Type de travaux | | | | |
| CAT 4 | a2 | TU010 | Château Rouge / Barbes - Rochechouart | Régénération maçonnerie | 32 | 3 | 6 | 4,5 |
| CAT 4 | a3 | TU010 | Château Rouge / Barbes - Rochechouart | Réfection d'enduit | 32 | 3 | 6 | 4,5 |
| CAT 4 | a4 | TU010 | BARBES – ROCHECHOUART | Réfection d'enduit | 31 | 2 | 6 | 5,5 |
| CAT 4 | a5 | TU010 | BARBES – ROCHECHOUART | Régénération maçonnerie | 31 | 2 | 6 | 5,5 |
| CAT 4 | a6 | TU010 | Barbes - Rochechouart / Gare du Nord | Régénération maçonnerie | 38 | 2 | 6 | 1 |
| CAT 4 | a8 | TU010 | GARE DE L'EST | Régénération maçonnerie | 33 | 4 | 6 | 1 |
| CAT 4 | a23 | TU010 | Saint Sulpice / Saint Placide | Régénération maçonnerie | 30 | 3 | 6 | 3,5 |
| CAT 4 | a24 | TU010 | Saint Sulpice / Saint Placide | Réfection d'enduit | 30 | 3 | 6 | 3,5 |
| CAT 3 | a1 | TU010 | PORTE DE CLIGNANCOURT | Régénération maçonnerie | 28 | 3 | 6 | 0 |
| CAT 3 | a7 | TU010 | Gare du Nord / Gare de l'Est | Régénération maçonnerie | 21 | 2 | 6 | 1 |
| CAT 3 | a12 | TU010 | Etienne Marcel / Les Halles | Réfection d'enduit | 22 | 3 | 6 | 0 |
| CAT 3 | a13 | TU040 | Etienne Marcel / Les Halles | Réfection d'enduit | 21 | 3 | 6 | 0 |
| CAT 3 | a14 | TU041 | Etienne Marcel / Les Halles | Réfection d'enduit | 22 | 3 | 6 | 0 |
| CAT 3 | a15 | TU010 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit | 26 | 2 | 6 | 3,5 |
| CAT 3 | a16 | TU010 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie | 26 | 2 | 6 | 3,5 |
| CAT 3 | a17 | TU050 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit | 26 | 2 | 6 | 3,5 |
| CAT 3 | a18 | TU050 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie | 26 | 2 | 6 | 3,5 |
| CAT 3 | a19 | TU060 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit | 27 | 3 | 6 | 3,5 |
| CAT 3 | a20 | TU060 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie | 27 | 3 | 6 | 3,5 |
| CAT 3 | a21 | TU070 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit | 26 | 3 | 6 | 3,5 |
| CAT 3 | a22 | TU070 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie | 26 | 3 | 6 | 3,5 |
| CAT 3 | a25 | TU010 | Vavin / Raspail | Réfection d'enduit | 26 | 3 | 6 | 0 |
| CAT 2 | a10 | TU010 | Strasbourg Saint Denis / Réaumur-Sébastopol | Régénération maçonnerie | 17 | 3 | 6 | 3,5 |
| CAT 2 | a11 | TU010 | Strasbourg Saint Denis / Réaumur-Sébastopol | Réfection d'enduit | 17 | 3 | 6 | 3,5 |
| CAT 2 | a9 | TU030 | GARE DE L'EST | Régénération maçonnerie | 17 | 3 | 6 | 1 |
| CAT 2 | a26 | TU010 | Raspail / Denfert Rochereau | Réfection d'enduit | 14 | 2 | 6 | 0 |

*Tableau 10-8 : Evaluation des PGE selon les critères C1 « **performance** », C2 « **impact de la défaillance** » et C3 « **opportunité de travaux** » et C4 « **groupement de travaux** » (Etape 2).*

***Définition des seuils d'indifférence et de préférence***
Dans la méthode ELECTRE III, le principe des seuils d'indifférence et de préférence est le même que celui de la méthode ELECTRE TRI ; nous adopterons donc les mêmes seuils que ceux de l'étape 1 (fig. 10-4).

Nous rappelons que les seuils d'indifférence et de préférence ne concernent que le *pseudo-critère* « ***performance*** ». Pour le reste des critères, il suffit d'attribuer la valeur 0 pour ne pas faire intervenir ces seuils.

***Veto***
Dans cette étape, nous devons également assurer que les actions présentant des situations intolérables doivent conserver leur priorité dans la programmation. Dans la méthode ELECTRE III, le principe du seuil de veto est le même que celui de la méthode ELECTRE TRI.

Pour définir une valeur de seuil de veto dans cette étape, nous rappelons que, dans le cas de la méthode ELECTRE III, les relations de surclassement sont établies par la comparaison entre actions réelles (et pas entre une action et un seuil de référence, comme dans la méthode ELECTRE TRI). Dans ce cas, pour proposer une valeur de seuil de veto, nous comparons la valeur attribuée aux actions présentant des situations intolérables ($C_1(a) = 56$) avec la valeur maximale qu'on trouve sur la ligne 4, celle de l'action $a_6$ ($C_1(a_6) = 38$). Nous attribuons ainsi une valeur de veto $\boldsymbol{v_1} = 56 - 38 = \boldsymbol{18}$. De cette façon, nous nous assurons que la différence de « *performance* » entre les actions intolérables et le reste des actions sera toujours supérieure ou égale à cette valeur, condition nécessaire pour déclencher le veto.

Cela garantit que les actions présentant une situation intolérable ne sont jamais surclassées dans la programmation par le reste des actions, quelles que soient leurs évaluations avec le reste des critères.

***Résultats***
L'application de la méthode ELECTRE III nous permet d'obtenir une hiérarchisation des PGE par ordre décroissant de priorité (tableau 10-9) :

| Rang de priorité | Action | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Code | Ouvrage | | Type de travaux |
| 1 | a2 | TU010 | Château Rouge / Barbes - Rochechouart | Régénération maçonnerie |
| | a3 | TU010 | Château Rouge / Barbes - Rochechouart | Réfection d'enduit |
| 2 | a23 | TU010 | Saint Sulpice / Saint Placide | Régénération maçonnerie |
| | a24 | TU010 | Saint Sulpice / Saint Placide | Réfection d'enduit |
| 3 | a8 | TU010 | Gare de l'Est | Régénération maçonnerie |
| 4 | a19 | TU060 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit |
| | a20 | TU060 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie |
| | a21 | TU070 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit |
| | a22 | TU070 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie |
| 5 | a4 | TU010 | Barbes - Rochechouart | Réfection d'enduit |
| | a5 | TU010 | Barbes - Rochechouart | Régénération maçonnerie |
| 6 | a1 | TU010 | Porte de Clignancourt | Régénération maçonnerie |
| | a25 | TU010 | Vavin / Raspail | Réfection d'enduit |
| 7 | a6 | TU010 | Barbes - Rochechouart / Gare du Nord | Régénération maçonnerie |
| 8 | a15 | TU010 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit |
| | a16 | TU010 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie |
| | a17 | TU050 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Réfection d'enduit |
| | a18 | TU050 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | Régénération maçonnerie |
| 9 | a10 | TU010 | Strasbourg Saint Denis / Réaumur-Sébastopol | Régénération maçonnerie |
| | a11 | TU010 | Strasbourg Saint Denis / Réaumur-Sébastopol | Réfection d'enduit |
| 10 | a12 | TU010 | Etienne Marcel / Les Halles | Réfection d'enduit |
| | a13 | TU040 | Etienne Marcel / Les Halles | Réfection d'enduit |
| | a14 | TU041 | Etienne Marcel / Les Halles | Réfection d'enduit |
| 11 | a7 | TU010 | Gare du Nord / Gare de l'Est | Régénération maçonnerie |
| 12 | a9 | TU030 | Gare de l'Est | Régénération maçonnerie |
| 13 | a26 | TU010 | Raspail / Denfert Rochereau | Réfection d'enduit |

*Tableau 10-9 : Résultats méthode ELECTRE III : hiérarchisation des PGE par priorité décroissante*

La méthode ELECTRE III nous fournit donc une hiérarchisation des PGE, dans laquelle les travaux de régénération et de réfection d'enduits ne sont pas séparés. Mais les budgets et la programmation de ces types de travaux sont indépendants. Pour régler cette situation, il suffit de séparer les actions en fonction du type de travaux concernés.

Nous obtenons ainsi une hiérarchisation des travaux de régénération de maçonnerie (tableau 10-10), et une autre hiérarchisation pour des travaux de réfection d'enduits (tableau 10-11) :

| Ordre | Action | | | Surface à traiter | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Code | Ouvrage | | m² | Cumulé (m²) |
| 1 | a2 | TU010 | Château Rouge / Barbes - Rochechouart | 2 138 | 2 138 |
| 2 | a23 | TU010 | Saint Sulpice / Saint Placide | 3 078 | 5 216 |
| 3 | a8 | TU010 | Gare de l'Est | 665 | 5 881 |
| 4 | a20 | TU060 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | 880 | 6 761 |
| 5 | a22 | TU070 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | 200 | 6 961 |
| 6 | a5 | TU010 | Barbes - Rochechouart | 1 710 | 8 671 |
| 7 | a1 | TU010 | Porte de Clignancourt | 87 | 8 758 |
| 8 | a6 | TU010 | Barbes - Rochechouart / Gare du Nord | 3 064 | 11 822 |
| 9 | a16 | TU010 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | 1 140 | 12 962 |
| 10 | a18 | TU050 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | 285 | 13 247 |
| 11 | a10 | TU010 | Strasbourg Saint Denis / Réaumur-Sébastopol | 875 | 14 122 |
| 12 | a7 | TU010 | Gare du Nord / Gare de l'Est | 4 275 | 18 397 |
| 13 | a9 | TU030 | Gare de l'Est | 570 | 18 967 |

*Tableau 10-10 : Hiérarchisation des **travaux de régénération** par priorité décroissante*

| Ordre | Action | | | Surface à traiter | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Code | Ouvrage | | m² | Cumulé (m²) |
| 1 | a3 | TU010 | Château Rouge / Barbes - Rochechouart | 1 151 | 1 151 |
| 2 | a24 | TU010 | Saint Sulpice / Saint Placide | 2 160 | 3 311 |
| 3 | a19 | TU060 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | 400 | 3 711 |
| 4 | a21 | TU070 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | 107 | 3 818 |
| 5 | a4 | TU010 | Barbes - Rochechouart | 990 | 4 808 |
| 6 | a25 | TU010 | Vavin / Raspail | 440 | 5 248 |
| 7 | a15 | TU010 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | 614 | 5 861 |
| 8 | a17 | TU050 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | 153 | 6 015 |
| 9 | a11 | TU010 | Strasbourg Saint Denis / Réaumur-Sébastopol | 875 | 6 890 |
| 10 | a12 | TU010 | Etienne Marcel / Les Halles | 767 | 7 657 |
| 11 | a13 | TU040 | Etienne Marcel / Les Halles | 808 | 8 465 |
| 12 | a14 | TU041 | Etienne Marcel / Les Halles | 400 | 8 865 |
| 13 | a26 | TU010 | Raspail / Denfert Rochereau | 3 360 | 12 225 |

*Tableau 10-11 : Hiérarchisation des **réfections d'enduit** par priorité décroissante*

Ce classement des ouvrages, en fonction de leur priorité, sera la base pour définir une programmation optimisée des travaux de régénération et de réfection d'enduits.

### 10.1.3 Etape 3 : Limitation des ressources disponibles

Les ressources technico-économiques disponibles pour mettre en œuvre les travaux de maintenance sont, par nature, limitées. Afin de proposer une programmation réaliste, nous dévons connaître ces limites pour les analyser au regard des hiérarchisations obtenues dans l'étape précédente.

Pour ce faire, on associe un coût à chaque action. On déroule ensuite la liste des opérations jusqu'à l'épuisement du budget disponible.

#### 10.1.3.1 Programmation des travaux de régénération de maçonnerie

***Définition du coût de la programmation (régénération de la maçonnerie)***
Le tableau 10-12 représente les surfaces et les coûts associés à chaque action :

| Ordre | Action | | | Surface à traiter | | Prix unitaire (€/m²) | Coût | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Code | Ouvrage | | m² | cumulé (m²) | | (€) | Cumulé (€) |
| 1 | a2 | TU010 | Château Rouge / Barbes - Rochechouart | 2 138 | 2 138 | 255 | 545 190 | 545 190 |
| 2 | a23 | TU010 | Saint Sulpice / Saint Placide | 3 078 | 5 216 | 255 | 784 890 | 1 330 080 |
| 3 | a8 | TU010 | Gare de l'Est | 665 | 5 881 | 255 | 169 575 | 1 499 655 |
| 4 | a20 | TU060 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | 880 | 6 761 | 255 | 224 400 | 1 724 055 |
| 5 | a22 | TU070 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | 200 | 6 961 | 255 | 51 000 | 1 775 055 |
| 6 | a5 | TU010 | BARBES - ROCHECHOUART | 1 710 | 8 671 | 255 | 436 050 | 2 211 105 |
| 7 | a1 | TU010 | PORTE DE CLIGNANCOURT | 87 | 8 758 | 255 | 22 185 | 2 233 290 |
| 8 | a6 | TU010 | Barbes - Rochechouart / Gare du Nord | 3 064 | 11 822 | 255 | 781 320 | 3 014 610 |
| 9 | a16 | TU010 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | 1 140 | 12 962 | 255 | 290 700 | 3 305 310 |
| 10 | a18 | TU050 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | 285 | 13 247 | 255 | 72 675 | 3 377 985 |
| 11 | a10 | TU010 | Strasbourg Saint Denis / Réaumur-Sébastopol | 875 | 14 122 | 255 | 223 125 | 3 601 110 |
| 12 | a7 | TU010 | Gare du Nord / Gare de l'Est | 4 275 | 18 397 | 255 | 1 090 125 | 4 691 235 |
| 13 | a9 | TU030 | GARE DE L'EST | 570 | 18 967 | 255 | 145 350 | 4 836 585 |

*Tableau 10-12 : Coût de la programmation des travaux de régénération*

***Etablissement de la limite de la programmation (régénération de maçonnerie)***
Nous rappelons que notre méthodologie n'a aucune capacité pour définir les ressources disponibles, qui sont décidées par la direction de la RATP. Pour des raisons de confidentialité, nous ne pouvons utiliser les données budgétaires réelles pour illustrer cette étape de notre méthodologie.

Dans ces circonstances, nous attribuons aléatoirement un budget annuel de 1 000 000 € pour la régénération de la maçonnerie de la ligne 4. Dans ce cas, les ouvrages à régénérer seraient (tableau 10-13) :

| Ordre | Action | | | Surface à traiter | | Prix unitaire (€/m²) | Coût | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Code | Ouvrage | | m² | cumulé (m²) | | (€) | Cumulé (€) |
| 1 | a2 | TU010 | Château Rouge / Barbes - Rochechouart | 2 138 | 2 138 | 255 | 545 190 | 545 190 |
| 2 | a23 | TU010 | Saint Sulpice / Saint Placide | 3 078 | 5 216 | 255 | 784 890 | 1 330 080 |

*Tableau 10-13 : Définition des limites de la programmation des travaux de régénération*

La régénération de l'ouvrage « Saint Sulpice / Saint Placide » dépasserait le budget total de 1.000.000 €, il ne pourrait pas théoriquement être régénéré dans sa totalité. Dans la pratique, la totalité de l'ouvrage serait réalisée, et le coût serait réparti sur deux exercices consécutifs. La programmation des travaux de régénération de maçonnerie pour l'année serait ainsi (tableau 10-14) :

| Ordre | Action | | | Surface à traiter | | Prix unitaire (€/m²) | Coût | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Code | Ouvrage | | m² | cumulé (m²) | | (€) | Cumulé (€) |
| 1 | a2 | TU010 | Château Rouge / Barbes - Rochechouart | 2 138 | 2 138 | 255 | 545 190 | 545 190 |
| 2 | a23 | TU010 | Saint Sulpice / Saint Placide | 1 784 | 3 922 | 255 | 454 810 | 1 000 000 |

*Tableau 10-14 : Programmation finale des travaux de régénération*

### 10.1.3.2 Programmation des travaux de réfection d'enduits

***Définition du coût de la programmation (réfection d'enduits)***

Le tableau 10-15 représente les surfaces d'enduit concernées par chaque action ainsi que leur coût associé :

| Ordre | Action | | | Surface à traiter | | Prix unitaire (€/m²) | Coût | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Code | Ouvrage | | m² | cumulé (m²) | | (€) | Cumulé (€) |
| 1 | a3 | TU010 | Château Rouge / Barbes - Rochechouart | 1 151 | 1 151 | 270 | 310 635 | 310 635 |
| 2 | a24 | TU010 | Saint Sulpice / Saint Placide | 2 160 | 3 311 | 270 | 583 200 | 893 835 |
| 3 | a19 | TU060 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | 400 | 3 711 | 270 | 108 000 | 1 001 835 |
| 4 | a21 | TU070 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | 107 | 3 818 | 270 | 28 993 | 1 030 828 |
| 5 | a4 | TU010 | BARBES - ROCHECHOUART | 990 | 4 808 | 270 | 267 300 | 1 298 128 |
| 6 | a25 | TU010 | Vavin / Raspail | 440 | 5 248 | 270 | 118 800 | 1 416 928 |
| 7 | a15 | TU010 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | 614 | 5 861 | 270 | 165 672 | 1 582 600 |
| 8 | a17 | TU050 | Saint Germain des Prés / Saint Sulpice | 153 | 6 015 | 270 | 41 418 | 1 624 018 |
| 9 | a11 | TU010 | Strasbourg Saint Denis / Réaumur-Sébastopol | 875 | 6 890 | 270 | 236 250 | 1 860 268 |
| 10 | a12 | TU010 | Etienne Marcel / Les Halles | 767 | 7 657 | 270 | 207 090 | 2 067 358 |
| 11 | a13 | TU040 | Etienne Marcel / Les Halles | 808 | 8 465 | 270 | 218 071 | 2 285 429 |
| 12 | a14 | TU041 | Etienne Marcel / Les Halles | 400 | 8 865 | 270 | 108 000 | 2 393 429 |
| 13 | a26 | TU010 | Raspail / Denfert Rochereau | 3 360 | 12 225 | 270 | 907 200 | 3 300 629 |

*Tableau 10-15 : Coût de la programmation des réfections d'enduit*

***Etablissement de la limite de la programmation (réfection d'enduits)***

Comme nous l'avons fait pour la régénération de la maçonnerie, nous proposons également ici un budget aléatoire pour illustrer notre méthodologie. En adoptant comme hypothèse que le budget consacré à la réfection d'enduits de la ligne 4 est de 500 000 €, le seul ouvrage à régénérer serait (tableau 10-16) :

| Ordre | Action | | | Surface à traiter | | Prix unitaire (€/m²) | Coût | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Code | Ouvrage | | m² | cumulé | | (€) | Cumulé (€) |
| 1 | a3 | TU010 | Château Rouge / Barbes - Rochechouart | 1 151 | 1 151 | 270 | 310 635 | 310 635 |
| 2 | a24 | TU010 | Saint Sulpice / Saint Placide | 2 160 | 3 311 | 270 | 583 200 | 893 835 |

*Tableau 10-16 : Définition des limites de la programmation des travaux de réfection d'enduit*

Au regard du montant des travaux de réfection des enduits de l'ouvrage « Saint Sulpice / Saint Placide » qui dépasse l'enveloppe disponible, il y aura lieu de prévoir une enveloppe « exceptionnelle » pour le prochain exercice, afin de pouvoir la programmer comme notre outil de priorisation nous le demande.

Pour l'exercice en cours, la programmation de travaux de réfection d'enduits serait donc limitée à une seule action « Château Rouge / Barbes – Rochechouart » (tableau 10-17) :

| Ordre | Action | | Surface à traiter | | Prix unitaire (€/m²) | Coût | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Code | Ouvrage | m² | cumulé | | (€) | Cumulé (€) |
| 1 | TU010 | Château Rouge / Barbes - Rochechouart | 1 151 | 1 151 | 270 | 310 635 | 310 635 |

*Tableau 10-17 : Programmation finale des travaux de réfection d'enduit*

NB : ce dépassement d'enveloppe pour une seule opération est très rare, et s'explique ici par le fait que notre simulation ne s'opère que sur une seule ligne (ligne 4), et qu'en conséquence notre budget ait été quelque peu limité pour garder un caractère cohérent.

## 10.2 *Application de l'outil d'évaluation de la programmation*

***Etape 4 : Evaluation de la programmation obtenue***

Cette dernière étape est à la fois une vérification de la pertinence du travail effectué lors des trois étapes précédentes, mais également une variable d'alerte et d'ajustement au maintien en bon état de notre patrimoine sur le long terme (Annexe 11).

Nous vérifions si notre investissement pour chaque catégorie de travaux est en corrélation avec l'investissement minimum qu'il y aurait lieu de prévoir, et sommes en mesure d'ajuster nos investissements pour les années à venir. Pour cela, l'évaluation doit être réalisée à l'échelle du patrimoine, et non à l'échelle d'une seule ligne, comme nous l'avons fait pour illustrer les étapes précédentes.

Cette évaluation n'est basée que sur la surface concernée par les travaux de maintenance que l'on peut réaliser. Dans ce contexte, le choix et la hiérarchisation des ouvrages réalisés lors des étapes précédentes n'ont aucun effet sur la surface totale à traiter, car cette surface n'est fonction que des ressources disponibles.

Compte tenu de ce qui précède, pour illustrer cette étape de façon réaliste et compréhensible, nous nous basons sur la programmation des travaux de maintenance réalisés sur tout le réseau RATP pendant l'année 2014.

Les diagrammes d'investissement par type de travaux que nous présentons dans les figures 10-6 et 10-7 ont été établis en fonction de l'ensemble du patrimoine RATP existant, et des investissements réalisés depuis aussi loin qu'il a été possible de les collecter.

### 10.2.1 Evaluation de la programmation de régénération de la maçonnerie

Les travaux de régénération de maçonnerie en 2014 ont généré un investissement de 3.500 K€, soit environ 13.725 m² de régénération de maçonnerie. En comparant cette quantité à la moyenne théorique représentée par la figure 10-6, nous constatons que la programmation de régénération de 2014 (barre jaune) est en-dessous et, en même temps, n'atteint pas la distribution qui assure le respect du cycle d'amortissement (barres vertes). A l'égard de ces résultats, les programmations futures devraient augmenter la surface à régénérer, et donc le budget à investir, pour assurer une gestion durable à long terme.

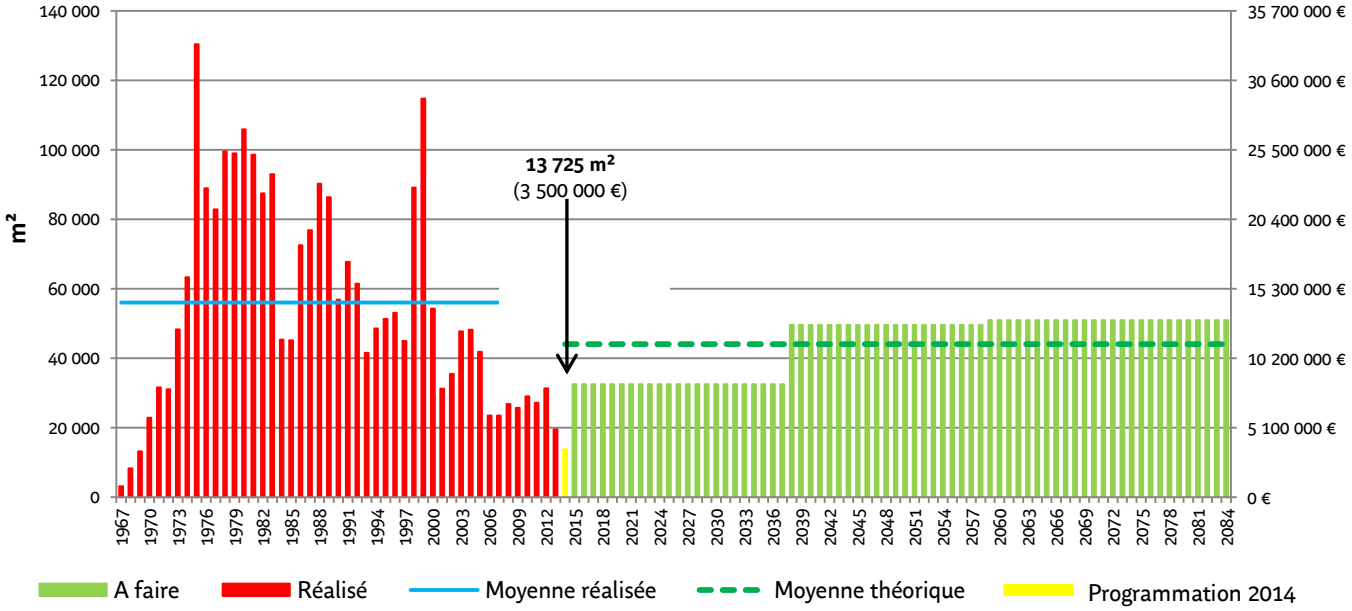



*Figure 10-6 : Comparaison de la programmation de régénération de maçonnerie obtenue avec une moyenne théorique*

### 10.2.2 Evaluation de la programmation de réfection d'enduit

Les travaux de réfection d'enduits ont généré en 2014 un investissement de 100 K€, soit environ 370 m² d'enduits. En comparant cette quantité par rapport à la moyenne théorique (fig. 10-7), nous constatons que la réfection d'enduit réalisée en 2014 et en-dessous de la programmation théorique et de la distribution qui assure le respect du cycle d'amortissement. Comme dans le cas précédent, les programmations futures de réfection d'enduit devraient augmenter considérablement.

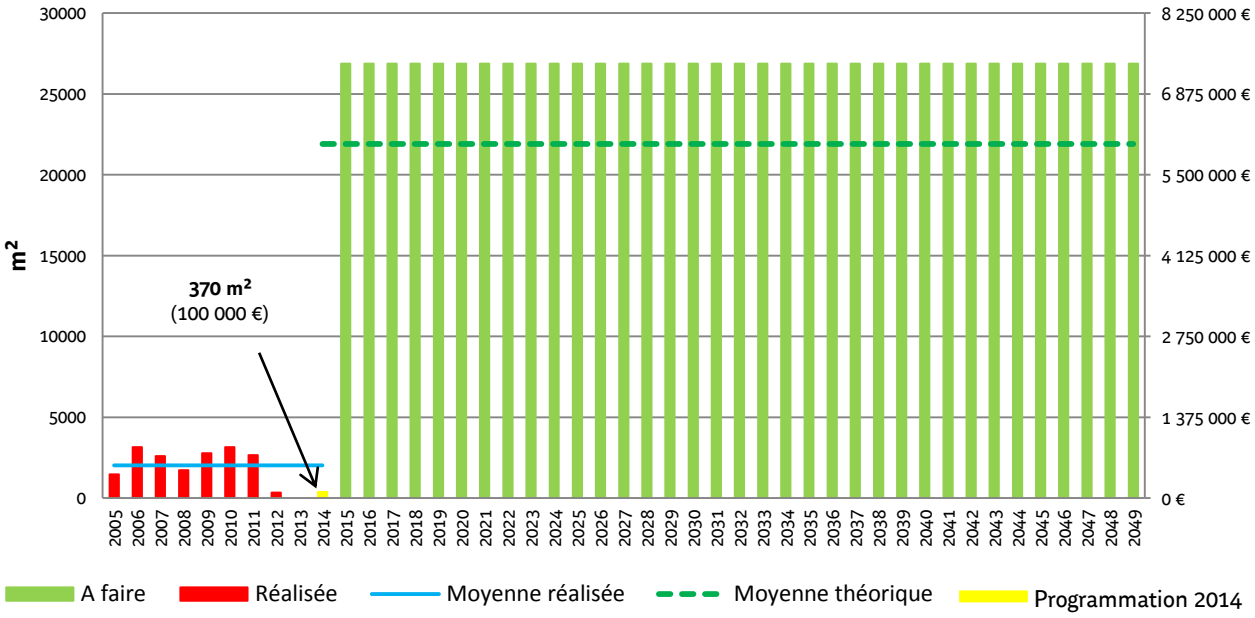



*Figure 10-7 : Comparaison de la programmation de réfection d'enduits avec une moyenne théorique*

## 10.3 *Analyse des résultats et discussions*

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'application de notre outil d'aide à la décision sur la ligne 4 du métro de Paris. Nous avons ainsi pu tester sa capacité à proposer une programmation réaliste et justifiée.

L'***étape 1*** établit un classement des PGE en 4 catégories, par ordre de priorité. Ce résultat nous donne une image globale de l'état du patrimoine et nous permet de proposer un ordre de grandeur des investissements à réaliser sur le long terme.

Dans un premier temps, nous proposons d'analyser les évaluations de « ***performance*** » des ouvrages par catégories de priorité (tableau 10-18) :

| | | Evaluation de la « *performance* » | |
|---|---|---|---|
| **Catégorie** | **Priorité** | **Valeur min** | **Valeur max** |
| CAT 4 | Travaux de réhabilitation entre 1 et 4 ans | 30 | 38 |
| CAT 3 | Travaux de réhabilitation entre 4 et 8 ans | 21 | 28 |
| CAT 2 | Travaux de réhabilitation +8 ans | 14 | 17 |
| CAT 1 | Surveillance (sans travaux de réhabilitation) | - | - |

*Tableau 10-18 : Distribution des évaluations de « **performance** » au sein de chaque catégorie de priorité*

Nous constatons que notre outil propose un classement cohérent, où les actions présentant les évaluations les plus élevées de « ***performance*** » sont affectées dans les catégories les plus urgentes. Ces résultats nous permettent d'assurer que la sécurité structurelle des ouvrages est bien prise en compte par notre outil.

En outre, les plages de valeurs de « ***performance*** » sont bien définies, sans chevauchement entre les différentes catégories de priorité. D'un côté, cela nous permet d'interpréter que notre outil assure que les ouvrages présentant des valeurs de « ***performance*** » élevées seront toujours classés dans les catégories prioritaires. De cette façon, on évite le risque de ne jamais entretenir les ouvrages qui présentent une importance mineure selon le reste de critères, car, a priori, ils seraient toujours relégués à l'arrière des priorisations. De surcroît, la capacité de veto que nous avons attribuée à la « ***performance*** » nous protège face à ce problème (§ 7.1).

De l'autre côté, ce résultat nous fait réfléchir sur l'influence exercée par les critères « ***impact de la défaillance*** » et « ***opportunité de travaux*** » dans les résultats de l'étape 1. Est-ce que ces critères sont pertinents ? Est-ce que l'évaluation de la « ***performance*** » suffirait pour définir les programmations des travaux de maintenance ? L'analyse que nous avons réalisée dans ce chapitre ne nous permet pas de répondre fidèlement à ces questions.

Nous rappelons que cette analyse a été appliquée sur les tunnels maçonnés de la ligne 4 du métro. Dans le cas du *critère* « ***impact de la défaillance*** », le fait de ne traiter qu'une seule ligne du réseau dans notre étude, annule l'effet des *paramètres* « ***fréquentation*** » et « ***image RATP*** » (tous les ouvrages obtiennent la même évaluation), ce qui explique la faible distribution de notes qu'on obtient pour ce *critère d'* « ***impact de la défaillance*** » : uniquement des valeurs comprises entre 2 et 4. Il conviendrait donc d'étendre l'étude à l'échelle du réseau pour pouvoir tester la pertinence de ce *critère* entre ouvrages appartenant à différentes lignes du réseau RATP.

Cet effet est accentué dans les cas du *critère* « ***opportunité de travaux*** », pour lequel on n'obtient que des évaluations de valeur 6. En effet, la ligne 4 est affectée par l'automatisation de l'exploitation et dans ce contexte tous les ouvrages de notre étude sont notés de la même façon selon le paramètre « ***politique de rénovation interne de la RATP*** ». En outre, les travaux de maintenance des tunnels maçonnés présentent une interaction faible avec le milieu

extérieur ; au contraire que les travaux de maintenance des tranchées couvertes métalliques, par exemple. Dans ce cas, l'évaluation des tunnels maçonnés selon le *paramètre* « ***travaux externes*** » n'adopterait la valeur 7 que dans des cas très ponctuels où la réalisation de travaux externes à proximité des tunnels exigeraient un renforcement des ouvrages. Nous tenons à nouveau à souligner l'intérêt à élargir l'échantillon de notre étude à l'échelle du réseau et, notamment, à la globalité des types d'ouvrages qui composent le patrimoine de la RATP. Par exemple, les tranchées couvertes et les viaducs métalliques sont des ouvrages beaucoup plus sensibles aux interactions avec le milieu extérieur que les tunnels maçonnés. Pour ce type d'ouvrages, le *critère* « ***opportunité de travaux*** » peut représenter une importance plus grande, voire exiger une reformulation de la construction de ce *critère* (addition de nouveaux paramètres, redéfinition des règles d'évaluation, etc.) que nous avons réalisée en nous basant sur les tunnels maçonnés uniquement.

L'***étape 2*** réalise une hiérarchisation des ouvrages tenant compte des résultats de l'étape précédente. Cette analyse plus fine nous apporte une vision à plus court terme de la gestion et nous permet de proposer une programmation des travaux de maintenance.

Dans cette étape, le *critère* « ***groupement de travaux*** » est ajouté dans la famille cohérente de critères de décision. Les résultats représentés par le tableau 10-9 nous montrent que certaines actions qui étaient affectées dans la CATEGORIE 3 lors de l'***étape 1*** deviennent plus prioritaires que certaines actions de CATEGORIE 4. Cette circonstance nous amène à réfléchir sur l'influence de ce *critère* dans le processus décisionnel : est-ce que vraiment ce *critère de* « ***groupement de travaux*** » est si important pour les gestionnaires de la RATP ? Dans notre étude, afin de simplifier les calculs, nous avons considéré que tous les *critères* présentent la même importance. Néanmoins, les méthodes ELECTRE permettent d'intégrer facilement des coefficients de pondération des *critères*. Cette possibilité de pondération permet de mieux adapter notre outil aux préférences des gestionnaires. Dans ce contexte, un échantillon d'étude plus large, représentatif des tous les lignes du réseau RATP et des différents types d'ouvrages, s'avère nécessaire pour définir les coefficients de pondération des *critères* d'une manière plus proche du raisonnement des gestionnaires de la RATP.

L'***étape 3*** nous permet d'établir les limites de la programmation de travaux en fonction des ressources technico-économiques disponibles. De cette façon, nous obtenons les programmations optimisées des travaux de régénération de maçonnerie et de réfection d'enduits.

L'attribution de ces ressources technico-économiques pour les actions de maintenance reste une décision de politique interne à la RATP. Notre outil d'aide à la gestion se limite à proposer et hiérarchiser les ouvrages à traiter. Dans ce cadre, la détermination d'un budget annuel d'investissement est hors de notre compétence.

Néanmoins, nous proposons, lors de l'***étape 4***, de comparer l'investissement du programme obtenu à un investissement théorique défini à partir des durées d'amortissement des travaux de réhabilitation. La représentation graphique de l'historique de travaux permet de réaliser des évaluations simples de la pertinence des programmations de travaux obtenues et d'estimer les besoins budgétaires futures. Ainsi, les gestionnaires de la RATP sont à même de juger si les budgets disponibles sont ou non suffisants pour mettre en place une politique de maintenance durable.

Cet outil d'évaluation a été élaboré à partir des durées d'amortissement des travaux de maintenance. Cette méthode est assez limitée, l'élaboration d'un modèle plus poussé, tenant compte d'autres variables susceptibles d'intervenir dans l'évolution du patrimoine pourrait s'avérer comme une perspective de développement de notre outil d'aide à la gestion.

## 10.4 *Validation de l'outil d'aide à la gestion du patrimoine RATP*

Dans ce chapitre, nous avons pu vérifier la capacité de notre outil d'aide à la gestion à analyser une situation réelle : la ligne 4 du métro de Paris. Nous avons également présenté les résultats fournis par l'outil d'aide à la gestion aux experts de la RATP qui ont une bonne connaissance de l'état du patrimoine.

Pour le cas précis d'étude de la ligne 4, nous avons pu constater que les ouvrages sélectionnés par notre outil font partie de la programmation de travaux qui sera mise en place pour l'année 2015. Néanmoins, nous avons trouvé des difficultés pour vérifier l'adaptation de notre outil au raisonnement des gestionnaires pour les raisons suivantes :

- ***Conflit d'échelles de raisonnement.*** Les gestionnaires réalisent les programmations de travaux à l'échelle du réseau, tandis que la programmation proposée dans notre étude a été définie à l'échelle de la ligne. Dans ce contexte, les gestionnaires ont du mal à valider nos résultats, car raisonner à l'échelle de la ligne signifie négliger les interactions entre lignes qui contribuent au fonctionnement globale du réseau, ce qui n'est pas une situation réelle.
- ***Manque de recul.*** Le développement de notre outil d'aide à la gestion nous a amené à introduire des nouveaux raisonnements dans le processus décisionnel, comme par exemple, la priorisation des actions (***étape 2***) et l'outil d'évaluation des programmations sur le long terme (***étape 4***). Généralement, dans la configuration des programmations, les gestionnaires décident si un ouvrage doit faire partie ou non de la programmation des travaux. Mais dans leur raisonnement ils n'établissent pas nécessairement une hiérarchisation relative entre actions comme celle que nous obtenons lors de l'***étape 2***. En outre, la vision sur le long terme de la gestion n'était pas formalisée et elle se basait uniquement sur l'expertise. Dans ces circonstances, nous n'avons pas assez de recul pour évaluer la pertinence des résultats concernant l'évaluation des programmations et les prédictions des programmations sur le long terme que nous obtenons dans l'***étape 4***.

Dans ce contexte, nous proposons les méthodes de validation suivantes :

- ***Analyse statistique des programmations précédentes.*** La capacité de notre outil d'aide à la gestion dépend de sa robustesse. Nous n'avons réalisé qu'une seule programmation de travaux susceptible d'être comparée à une programmation réelle réalisée par les gestionnaires de la RATP : les travaux de régénération de maçonnerie et de réfection d'enduits sur la ligne 4 pour l'année 2015. Pour valider notre outil, nous proposons de réaliser des nouveaux tests à l'échelle du réseau, à partir de l'historique de données enregistrées dans la base de données MARION depuis sa mise en place en 2003. Les résultats fournis par notre outil pourront ensuite être comparés avec les différentes programmations de travaux qui ont été réalisées. De cette façon, nous aurions une base pour apporter des éventuelles modifications qui permettraient d'améliorer la robustesse de notre outil.

- ***Suivi et comparaison avec les programmations futures.*** Afin d'arriver à un outil d'aide à la gestion opérationnel, il est nécessaire une période d'adaptation. Dans l'élaboration de notre outil, l'utilisation des méthodes ELECTRE a introduit des concepts d'aide à la décision complexes. Le principe du fonctionnement de la méthode ELECTRE TRI, certains éléments tels que le seuil de coupure λ, les seuils de référence $b_h$, etc. peuvent être, au premier abord, difficiles à comprendre pour les gestionnaires qui ne sont pas familiarisés avec les outils multicritère d'aide à la décision. Dans ces circonstances, cette période d'adaptation doit permettre la découverte de l'outil et son appropriation progressive de la part des gestionnaires de la RATP. De surcroît, le suivi des applications de notre outil d'aide à la gestion pour configurer les programmations futures pourrait nous servir de base à des discussions avec les gestionnaires pour identifier les pistes d'amélioration de notre outil et pour proposer éventuellement des nouveaux critères permettant d'affiner l'expression des préférences des gestionnaires.

# Synthèse de la Partie IV

Dans cette partie nous avons appliqué notre outil d'aide à la gestion du patrimoine de la RATP sur un cas d'étude réel : la ligne 4 du métro de Paris. Comme résultat, nous avons proposé, à partir des données de l'année 2014, une programmation des travaux de régénération de la maçonnerie et de réfection d'enduits pour l'année 2015. Ensuite, en fonction d'un budget hypothétique, nous avons testé un outil d'évaluation permettant de juger la pertinence des programmations obtenues vis-à-vis de la pérennité du patrimoine.

Cet outil d'aide à la gestion du patrimoine de la RATP nous a permis de formaliser le processus décisionnel dès l'évaluation des désordres jusqu'à la définition de la programmation des travaux de maintenance. Cette formalisation apporte plus de transparence et met en évidence les évaluations intermédiaires. Notamment, l'utilisation des méthodes ELECTRE présente l'avantage, face aux méthodes du critère unique de synthèse, d'éviter l'aspect compensatoire. De surcroît, les méthodes ELECTRE permettent une vision directe des critères et de l'information qui déterminent les prises des résultats. De l'autre côté, dans le cas d'avoir utilisé la méthode du critère unique de synthèse, ces informations seraient « masquées » sous une seule note. Dans ces circonstances, il serait plus difficile de revenir sur les cas où les décisions peuvent résulter, a priori, moins intuitives et qui nécessiteraient une réflexion plus approfondie. Par contre, l'introduction des méthodes ELECTRE dans l'élaboration de notre outil d'aide à la gestion peut produire, dans un premier temps, un effet de « boîte noire » pour ceux qui ne sont pas familiarisés avec les méthodes d'aide à la décision.

La vision à long terme de la gestion est améliorée. Les gestionnaires disposent d'un outil leur permettant de juger si les budgets disponibles sont suffisants pour assurer une gestion du patrimoine durable ou si au contraire ces budgets doivent être augmentés. De surcroît, cette vision sur le long terme permet de connaître l'influence que les programmations actuelles auront sur les programmations futures. Les gestionnaires pourront anticiper les situations indésirables comme une accumulation des travaux à réaliser non envisageable pour des raisons techniques, économiques ou de fonctionnement du réseau.

Enfin, nous rappelons que notre outil d'aide à la décision n'a été appliqué dans cette partie que sur la seule ligne 4 du métro. Cependant, notre méthodologie a été développée pour être appliqué sur le patrimoine dans sa globalité. Il serait dès lors intéressant, dans l'optique d'une validation de notre outil, de réaliser des simulations sur un échantillon plus large comprenant les différents types d'ouvrages et toutes les lignes du réseau RATP. Cela nous permettrait, au besoin, de compléter ou de modifier la procédure que nous avons développée afin de mieux l'adapter à la réalité.

# Conclusions et perspectives

Les gestionnaires du patrimoine de la RATP doivent assurer la sécurité et la capacité de service d'un parc d'infrastructures ferroviaires qui transporte près de 10 millions de voyageurs par jour. Le contexte économique actuel et les exigences de service et de développement de ce réseau de transports induisent un besoin d'optimiser la stratégie de maintenance. Il s'agit donc d'assurer la pérennité du patrimoine et d'obtenir la meilleure performance des ouvrages à partir de budgets par nature, limités, ainsi que des contraintes économiques et techniques de plus en plus exigeantes.

Pour atteindre cet objectif, un outil d'aide à la décision capable d'argumenter et de justifier une configuration optimisée des programmes de maintenance a été développé. Cette méthode permet de choisir et de hiérarchiser les ouvrages à traiter. Elle tient compte du cycle de vie des ouvrages, de l'agressivité de l'environnement accélérant leur dégradation et des différentes contraintes socio-économiques intervenant dans la gestion du patrimoine.

Les premiers résultats obtenus concernent la modélisation du fonctionnement et des mécanismes de dégradation des tunnels en maçonnerie du réseau RATP. Cette modélisation comporte des résultats en recherche et développement.

En recherche, une méthodologie d'évaluation de la performance a été appliquée. Grâce à la modélisation fonctionnelle, nous identifions les informations techniques à prendre en compte pour compléter la note MARION. Cette information est formalisée sous la forme de paramètres. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur la méthode d'affectation à base de règles (Azibi, 2003). Ensuite, ces paramètres sont agrégés dans un *critère de* « ***performance*** ». Nous avons adopté la méthode de l'arbre d'agrégation qui permet une agrégation structurée de paramètres hétérogènes dans un seul critère (Labbouz, 2008). Ce nouveau *critère de* « ***performance*** » nous apporte une vision plus représentative de la performance des ouvrages et une notation plus discriminante : cela facilitera la prise de décision des gestionnaires au moment de définir la programmation des travaux de maintenance.

En développement, nous avons appliqué les outils de la Sûreté de Fonctionnement aux tunnels maçonnés : l'Analyse Fonctionnelle (AF), l'Analyse des Modes de Défaillance et leurs Effets (AMDE) et les graphes causaux. Cette modélisation fonctionnelle permet la représentation des processus fonctionnels de dégradations s'opérant dans ce type d'ouvrages. Dans un cadre plus applicatif, ces résultats permettent :

- **d'améliorer les inspections visuelles**. Les résultats de l'AMDE ont permis d'identifier l'ensemble des facteurs impliqués dans la chaine de dégradation des ouvrages. De cette façon, le diagnostic est amélioré grâce à une meilleure compréhension des causes des défaillances observables lors des inspections visuelles. En outre, nous avons obtenu une liste exhaustive des désordres que peuvent présenter les tunnels maçonnés, ce qui permet de réduire la variabilité de l'information collectée.
- **de formaliser l'expertise**. L'application de l'AMDE permet de mettre en valeur toutes les informations compilées lors des visites et inspections qui, parfois, sont masquées par la note générale de santé MARION ou, tout simplement, se perdent lors des transmissions d'informations entre les différents intervenants du processus décisionnel. Suite à l'AMDE et à la construction des graphes causaux, l'information disponible issue des inspections visuelles est structurée, ce qui lui permet d'être mieux exploitée par les gestionnaires dans la phase de prise de décisions.

- **d'évaluer les risques.** Nous avons identifié les risques hydrogéologiques qui concernent les tunnels maçonnés. L'évaluation de ces risques nous permet de proposer une première hiérarchisation des travaux à réaliser, en priorisant les ouvrages placés dans les environnements les plus agressifs.

La deuxième famille de résultats concerne la construction d'un outil multicritère d'aide à la décision avec un double objectif : justifier les budgets nécessaires et définir une programmation optimisée des travaux de maintenance. Elle comporte aussi des résultats en recherche et en développement.

En recherche, nous proposons une démarche de formalisation de l'expertise pour construire une famille cohérente de critères complétant l'évaluation de la performance des ouvrages avec l'intégration des contraintes de différentes natures qui interviennent dans la gestion du patrimoine. Cette famille cohérente permet de prendre en compte les points de vue et les contraintes intervenant dans l'ensemble du processus décisionnel. Ensuite, nous formalisons le problème décisionnel de la gestion du patrimoine grâce aux méthodes multicritère d'aide à la décision. L'outil multicritère d'aide à la gestion du patrimoine de la RATP obtenu permet aux gestionnaires de considérer les effets de la variabilité des informations issues des inspections visuelles et d'intégrer les informations hétérogènes.

En développement, nous avons bâti un outil d'aide à la gestion, qui formalise le processus décisionnel dès l'évaluation des désordres, jusqu'à la définition de la programmation des travaux de maintenance. Cette formalisation apporte plus de transparence et met en évidence les raisons des décisions arrêtées. En outre, la vision à long terme de la gestion est améliorée. Les gestionnaires disposent d'un outil leur permettant de juger si les budgets disponibles sont suffisants pour assurer une gestion du patrimoine durable ou si, au contraire, ces budgets doivent être augmentés. De surcroît, cette vision sur le long terme permet de connaître l'influence que les programmations actuelles pourront avoir sur les programmations futures. Les gestionnaires pourront anticiper les situations indésirables, comme une accumulation de travaux à réaliser non envisageable pour des raisons techniques, économiques ou de fonctionnement du réseau.

Afin d'apprécier ses intérêts et ses limites, l'outil d'aide à la décision proposé a été appliqué sur la ligne 4 du métro parisien. L'analyse critique des résultats obtenus montre que :

- La méthodologie semble adaptée au processus décisionnel des gestionnaires de la RATP. Elle permet de formaliser l'expertise et de structurer l'information à prendre en compte pour configurer les programmations des travaux de maintenance ;
- La capacité de la méthodologie à proposer des programmations de travaux a été vérifiée. Toutefois, il est difficile de conclure définitivement, la comparaison n'ayant été faite que sur une seule ligne de métro. Pour cela, il conviendrait de poursuivre plus amplement ces analyses sur des cas réels et d'élargir l'échantillon d'étude à une échelle globale du réseau. Cela permettrait d'obtenir des résultats plus représentatifs de la réalité et d'éventuellement ajuster et modifier cet outil multicritère d'aide à la décision.
- Pour devenir un outil entièrement fonctionnel, des développements importants supplémentaires restent à produire, notamment l'adaptation de l'ensemble des critères de décision pour les différents types d'ouvrages qui composent le patrimoine d'infrastructures de la RATP.

Au final, un outil multicritère d'aide à la gestion du patrimoine de la RATP a été proposé, prenant compte du cycle de vie des ouvrages, de l'agressivité de l'environnement (provoquant leur dégradation) et des différentes contraintes socio-économiques intervenant dans la gestion

du patrimoine. On peut considérer que cet outil constitue les bases d'un outil prototype d'aide à la décision, destiné à moyen terme à être utilisé par les gestionnaires de la RATP. Il permet de répondre à la problématique traitée dans cette thèse, puisque avec lui, les gestionnaires peuvent réaliser le choix et la hiérarchisation des ouvrages à traiter. En outre, nous avons défini les bases d'un outil d'évaluation permettant de vérifier si les budgets consacrés à la maintenance sont en corrélation avec une stratégie de maintenance durable à long terme.

Une première perspective de ce travail consisterait à élargir la méthodologie à l'ensemble des ouvrages qui forment le patrimoine de la RATP, notamment les ouvrages métalliques, pour lesquels les mécanismes de dégradation diffèrent considérablement de ceux des ouvrages en maçonnerie. Dans ce cas, l'évaluation des critères de « ***performance*** » et d' « ***opportunité de travaux*** » exigeraient une étude à part entière.

Un deuxième axe de recherche concernerait le développement d'une modélisation plus fine du fonctionnement des ouvrages, permettant d'améliorer la prédiction de l'évolution des ouvrages et l'impact des travaux de maintenance sur leur état structurel. De tels moyens permettraient d'obtenir une notion plus réaliste de la durée de vie des ouvrages et d'identifier les moments optimaux pour réaliser les interventions de maintenance conditionnelle.

Finalement, un outil d'évaluation des programmes de maintenance a été ébauché. Cela pourrait représenter un axe de recherche permettant d'approfondir vers une vision à long terme de la gestion. Nous pourrions ainsi mieux estimer en amont les effets des stratégies de maintenance, et ajuster les programmations futures en fonction de ces estimations.

En termes opérationnels, une première perspective de cette recherche consisterait à intégrer l'outil d'aide à la décision obtenu à la base de données MARION existante. Cette évolution permettrait de centraliser toute l'information nécessaire intervenant dans cet outil et de cartographier les évaluations des ouvrages selon les critères de décision proposés. Cela aurait un double avantage : d'une part, améliorer l'accessibilité à l'information aux différents intervenants dans le processus décisionnel ; d'autre part, améliorer la transparence et la visibilité des arguments qui justifient la configuration des programmations de maintenance.

Pour conclure, nous voudrions évoquer les limites qui caractérisent l'outil obtenu. Dans son développement, nous avons visé à formaliser l'expertise afin de réduire la part d'arbitraire qui intervient dans le processus décisionnel de la gestion patrimoniale. Néanmoins, un outil d'aide à la décision ne pourra jamais remplacer le rôle du décideur. Dans ce cas, l'utilisation des méthodes ELECTRE exige l'intervention des gestionnaires au moment de définir certains éléments dont dépend leur fonctionnement. Le seuil de coupure $\lambda$, les seuils de référence $b_h$, les seuils de veto, etc. sont des paramètres qui doivent être définis par les gestionnaires, en fonction de leurs préférences. Dans ce cas, une période d'adaptation s'avère nécessaire pour que les gestionnaires de la RATP puissent s'approprier du fonctionnement de l'outil développé et définir un calibrage correct à partir de l'information obtenue à l'aide des premiers cas d'application.

En outre, l'outil d'aide à la gestion du patrimoine de la RATP a été réalisé à « un moment donné », où nous avons formalisé la stratégie de gestion actuelle. Néanmoins, la gestion patrimoniale est évolutive : le réseau de transport de la RATP augmente constamment, les exigences de qualité de service évoluent, les politiques de gestion changent, etc. De surcroît, des nouvelles méthodes d'évaluation et de diagnostic des ouvrages plus performantes se développent, comme par exemple, la méthode de diagnostic développée dans le cadre du projet ANR MéDiTOSS. Tous ces facteurs de nature technique et socio-économique pourraient s'intégrer dans les futures stratégies de gestion de la RATP, en modifiant le panorama actuel qui a servi de base pour cette recherche. Cette évolution constante représente donc un défi que l'outil doit affronter. Dans ce contexte, nous devons assurer que cet outil d'aide à la gestion doit être capable de suivre ces évolutions sans nécessité de le reconstruire, mais de l'adapter. Dans

ce cas, les méthodes adoptées (notamment l'affectation à base de règles et les méthodes ELECTRE) favorisent la transparence l'architecture de notre outil et facilitent son actualisation (intégration de nouveaux critères de décision, pondération entre critères, etc.). Dans ce contexte, un suivi continu du fonctionnement de l'outil de part des gestionnaires de la RATP s'avère nécessaire. En outre, pendant cette période, l'application de l'outil produira des données essentielles pour réaliser des études statistiques qui permettront d'améliorer progressivement son fonctionnement et sa robustesse sur le long terme.

# Bibliographie

# Bibliographie

**Abraham D. M., Wirahadikusumah R., Short T. J., Shahbahrami S.** (1998). *Optimization modelling for sewer network management*. *Journal of construction engineering and management ASCE*, vol 124, n°5, pp. 402-410

**AFNOR.** (1988). *Norme expérimentale X60-500 Terminologie relative à la fiabilité maintenabilité - disponibilité*. 44 p.

**AFNOR.** (2001). *Norme homologuée NF EN13306 Terminologie de la maintenance*. 59 p.

**Aufor, P., Ardillon, E., Dubreuil-Chambardel, A.** (2003). *L'optimisation de la maintenance des structures passives dans le nucléaire. Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants.* Presses de l'école nationale des ponts et chaussés, pp. 301-311.

**AUGC.** (2003a). *Le développement durable en génie civil, 22ème Rencontres Universitaires de Génie Civil*. Volume 1: 477 p.

**AUGC**. (2003b). *Le développement durable en génie civil, 22ème Rencontres Universitaires de Génie Civil*, "Prix René Houpert". Volume 2: 278 p.

**Azibi, R.** (2003). *Construction de critères en aide à la décision : aspects méthodologiques, techniques et pratiques*. Rapport de thèse, Université Paris Dauphine. Paris, 160 p.

**Bana e Costa, C.A., Vansnick, J.C.** (1997). *Applications of the MACBETH approach in the framework of an additive aggregation model*. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis Vol.6 (2). pp.107-114.

**Baroth J., Breysse D., Schoefs F.** (2011*). Fiabilité des ouvrages : sûreté, variabilité, maintenance, sécurité*, Paris, Hermes-Lavoisier.

**Barraqué, B., Isnard, L.** (2010). *Long term management of infrastructure in France. Available tools and use difficulties*. Metropolitan Water District California.

**Ben Mena, S.** (2000). *Introduction aux méthodes multicritère d'aide à la décision* Biotechnol. Agron. Soc. Environ, volume 4(2), pp. 83-93.

**Biette, L.** (1928). *Encyclopédie du génie civil et des travaux publiques. Chemins de Fer Urbains parisiens.* Ed. J.-B Baillière et Fils. (1928)

**Bollinger, D., Maystre, L.Y., Slowinski, R.** (1997). *Un cas concret de la contribution de l'aide multicritère à la décision à la coordination inter-cantonale pour l'incinération des déchets urbains*. 45ème Journées du Groupe de Travail Européen "Aide Multicritère à la Décision". Celakovice, République Tchéque.

**Boiteux, M. & Willumsen, L.** (2001). *Transports : choix des investissements et coûts des nuisances* - Rapport BOITEUX, Commissariat général du plan, 2001.

**Bouyssou, D.** (1990). *Building criteria : A prerequisite for MCDA*. In C. Bana e Costa, editor, Readings in Multiple Criteria Decision Aid, pages 58-80. Springer-Verlag, Berlin.

**Brandon E., Cruchon P., Degoutte., Du Bois M., Guenon C., Kahan J-M., Le Delliou P., Monié N., Rat G.**, (2008). *Guide de lecture des études de dangers des barrages.* Bulletin officiel du Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire, 30 novembre 2008, 49 p.

**Brans J.P, Vincke P.** (1985). *A Preference Ranking Organization Method*. Management Science, 31, 6. p647-656.

**Breysse D., Boissier D.** (2002). *L'évaluation et la maintenance des réseaux d'assainissement. In: Cremona C., Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants.* Association Française de Génie Civil, 451 p.

**CEA.** (2000). *A guide to dam risk management*. Canadian Electricity Association – Dam Safety Interest Group, p.

**CETU** (2004). *Le guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers*. Centre d'Etudes des Tunnels. Ministère de l'Equipement, des Transports et du Logement.

**Clivillé V.** (2004). *Approche Systémique et méthode multicritère pour la définition d'un système d'indicateurs de performance*. Thèse de l'Université de Savoie, Annecy, 216 pages.

**Combes M.J.** (2014). *Grands chantiers – Eté 2014*. Matinée CPMO 2014. Document interne RATP.

**Cremona C.** (2003). *Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants*. Association Française de Génie Civil, 451 p.

**Dague P., Travé-Massuyès L.** (2004). *Raisonnement causal en physique qualitative*. Rapport
LAAS 04322, 32 p.

**Delfosse G.** (2001). *La politique technique de restauration du réseau routier national. In: Journées scientifiques et techniques du CETMEF*, 2, 3 et 4 octobre 2001. pp. 2

**Despujols A.** (2012). *Méthodes d'optimisation des stratégies de maintenance*. Editions Techniques de l'Ingénieur, Paris. 17 p.

**Diab Y.** (2002). *La gestion du patrimoine enterré : approche multi-critère d'analyse des risques*. In: INFRA 2002, Montréal, Québec, pp. 7

**Dieudonné, S., Peyras, L., Royet, P.,** (2014). *Le retour d'expérience des études de dangers de barrages en France*. 8èmes Journées Fiabilité des Matériaux et des Structures. Aix-en-Provence, 9 et 10 avril 2014. 12 p.

**Douroux, J-F.** (2012). *Les ouvrages en béton armé et béton précontraint à la RATP*. Formations internes RATP.
**Duarte Barrio, C.** (2012). *Politique d'investissement pour les infrastructures de génie civil*. Mémoire de commissionnement RATP.

**Dupont P., Londinsky N.** (2004). *Préserver un patrimoine d'assainissement évalué à 2,5 milliards d'euros, en Seine-Saint-Denis, et l'améliorer*. In: 22ème Rencontres Universitaires de Génie Civil, Université de Marne la Vallée, France, 3 et 4 juin 2004. pp. 2.

**Dupuy, G.** (1986). *The Plight of American Infrastructure : What Reasons for the Neglect ? Commentaire de la Communication de Gakenheimer.* Le Financement des équipements publics de demain. Paris, Ed. Economica, p. 135-138.

**Fauchoux G .** (2006) *VSC Méthode d'aide à la gestion de patrimoines*. Guide technique, Collection Techniques et Méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, LCPC, 2006.

**Fauchoux G., Billon J., Bourneton N., L'Hermite S., Michel M., Riou L., Thauvin B.** (2011). *Application de la méthode VSC à la gestion d'un parc d'ouvrages portuaires*. CETMEF 2011.

**Ghariani, N., Curt, C., Tacnet, TM.** (20014). *Analyse des dysfonctionnements des ouvrages de protection contre les crues torrentielles*. 8èmes Journées Fiabilité des Matériaux et des Structures. Aix-en-Provence, 9 et 10 avril 2014. 12 p.

**Gonzva M., Gautier P., Diab Y., Barroca B.** (2014). *Résilience des systèmes de transport guide face aux risques naturels*. 19ème Congrès de Maîtrise des Risques et Sûreté de Fonctionnement. Dijon, 21-23 octobre 2014. 10 p.

**Grabisch, M.** (1996). *The application of fuzzy integrals in multicriteria decision making*. European Journal of Operational Research, 89, 445-456.

**Grabisch, M., Perny, P.** (2002). *L'aide multicritère à la décision*. *Logique floue, principe, aide à la décision*, Hermès: pp. 81-120.

**Goirand, P.** (2012). *Les ouvrages souterrains en maçonnerie*. Formations internes RATP.

**Guitouni A.** (2000). Méthodes Multicritère d'Aide à la Décision. Notes de cours MQT-60791, Université Laval, 2000.

**Guitouni A, Martel J-M, Vincke Ph.** (1999). *Un Cadre de Référence pour le Choix d'une Procédure d'Agrégation Multicritère*. Document de travail, FSA-1999-013, Université Laval, Québec, Canada.

**Hammami, A.** (2003). *Modélisation techno-économique d'une chaîne de logistique dans une entreprise réseau*. Rapport de thèse, Faculté des Sciences et de Génie, Université de Laval, Quebec, Canada, 263 p.

**Hervieu J.** (1903). *Le chemin de fer métropolitain municipal de Paris.* Librairie Polytechnique. Editeur Ch Béranger.

**Iddir O.** (2008). *Le nœud papillon : une méthode de quantification du risque majeur*. Techniques de l'ingénieur, n° SE 4055.

**IDSOA,** (2008). *Instruction Générale sur la surveillance des ouvrages ferroviaires*. RATP.

**ISDF.** (?). *AMDEC- Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité - guide pédagogique.* Ed. ISDF - Institut de la Sûreté de Fonctionnement, 36 p.

**Johnson P. A.** (1999). *Fault tree analysis of bridge failure due to scour and channel instability*. Journal of infrastructure system, Vol 5, n°1, pp. 35-36.

**Kaplan S.** (1997). *The words of risk analysis*. Risk Analysis, vol 17, n°24, pp.

**Keeney, R.L., Raïffa, H.** (1976). *Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs*. John Wiley & Sons, New York, 592 p.

**Keeney R.L.** (1982). *Decision analysis : An Overview*. INFORMS : Institute for Operations Research, volume n°30, 803 p.

**Keeney R.L.** (1988). *Structuring objectives for problems of public interest*. Operations Research 36, 396 – 405.

**Labbouz, S.** (2008). *Le choix du tracé d'une ligne de transport en commun en site propre et de la position de sa plateforme en milieu urbain. L'utilisation des outils mathématiques au service de la concertation.* Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 440 p.

**Laffréchine K.** (1999). *Base de données urbaine pour la gestion des réseaux d'assainissement non-visitables.* Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 170 p.

**Lair J.** (2000*). Evaluation de la durabilité des systèmes constructifs du bâtiment*. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont 2, 213 p.

**Lamé A.** (2013). *Modélisation hydrogéologique des aquifères de Paris et impacts des aménagements du sous-sol sur les écoulements souterrains*. Thèse de doctorat, Université ParisTech, 212 p.

**Lannoy A., Procaccia H.** (2005). *Evaluation et maîtrise du vieillissement industriel*. Paris: Lavoisier, Tec & Doc, collection EDF R&D, 361 p.

**Le Gauffre, P., Laffrèchine, K., Baur R., di Federico, V., Eisenbeis, P., König, A., Kowalski, M., Saegrov, S., Torterotot, J.-Ph., Tuhovcak, L., Werey, C.** (2002), CARE-W : WP 3 - *Decision support for annual rehabilitation programmes.* Research and technological development project of european community. 76 p.

**Le Gauffre P., Joannis C.** (2004a). *Multi-criteria decision support approach to sewer asset management. In: DMUCE4 (Decision Making in Urban and Civil Engineering)*, Porto, Portugal, 28-30 octobre 2004. pp. 10

**Le Gauffre, P., Joannis, C., Breysse, D., Gibello, C., Desmulliez, J.J.** (2004b). *Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbain - Guide méthodologique - (RERAU)*. Editions: Tec & Doc Lavoisier, 416 p.

**Le Gauffre P., Laffréchine K., Baur R., Poinard D., Haidar H., Schiatti M.** (2004c). *Aide multicritère aux décisions de réhabilitation d'un réseau d'eau potable*. XXIIèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil 2004 – Université de Marne-la-Vallée. Actes sur CD-ROM.

**Le Gauffre, P., Closet, J-F., Joannis, Werey, Rozan, Morand.** (2008). *Indicateurs de performance pour la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains*. Rapport intermédiaire 18 mois INDIGAU

**Lemaire, S.** (2006). *Aide au choix des produits de construction sur la base de leurs performances environnementales et sanitaires*. Rapport de thèse, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. 247 p.

**Lepert, P.** (2006). *Gestion technico-économique des infrastructures routières*. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°261-262, avril/mai/juin 2006, pp 3-23.

**Leroy, A., Signoret, J.P.** (1992). *Le risque technologique*. Paris : Ed. Presses Universitaires de France - Que sais-je ?, n°2669. 128 p.

**Lewis, S., Smith, K.,** (2010). *Lessons Learned from Real World Application of the Bow-tie Method*, 6th Global Congress on Process Safety, San Antonio, Texas, Mars 2010.

**Llanca, D.** (2014). *Méthodologie de diagnostic des tunnels et ouvrages souterrains en service*. Rapport de thèse, Université Blaise Pascal – Clermont II. 249 p.

**Llanos, J.** (1992). *La maintenance des ponts routiers. Approche économique*. Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, 1992

**Martel, J.M., Zaras, K.** (1995). *Stochastic Dominance in Multicriterion Analysis under Risk*. Theory and Decision, volume 39, pp. 31-49.

**Maystre, L.Y., Pictet, J., Simos, J.** (1994*). Méthodes multicritère ELECTRE : description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, CHE, 323 p.

**Millet R. A., Fellow P. E.** (1999). *Failures : how to avoid them.* Journal of management in engineering, september/october 1999, Issue 5, pp. 32-36.

**Mirouze, F.** (2014). *Répartition des notes des Procès-Verbaux MARION pour les années 2011, 2012 et 2014*. Document interne RATP.

**Moreno Regan, O.** (2012). *Application de la méthode des éléments distincts à la modélisation de tunnels en maçonnerie du métro parisien.* Université de Toulouse.

**Mortureux Y.** (2002). *Arbre de défaillances, des causes et d'événement, Sécurité et gestion des risques*.

**MSG-3** (1993). *Revision 2. Maintenance Steering Group 3 Task Force*. Air Transport Association of America. Septembre 1993.

**Orcesi A.** (2008). *Etude de la performance des réseaux d'ouvrages d'art et détermination des stratégies de gestion optimales*. Université Paris-Est, 2008. French. <tel-00348406>.

**Paterna A.** (2009). *Développement de méthodes et d'outils pour analyser et modéliser le fonctionnement des tranchées couvertes en phase de chantier*. Ecole d'Ingénieurs de la Ville de Paris.

**Paterna A., Vuillet M., Duarte Barrio C., Serre D., Diab Y.** (2013). *Proposition d'un outil d'optimisation technico-économique de la gestion patrimoniale des ouvrages de la RATP*. 31èmes Rencontres Universitaires de l'AUGC. 10 p.

**Paterna A., Vuillet M., Duarte Barrio C., Diab Y., Serre D.** (2014). *Methodology for the elaboration of a technical and economical optimisation tool to optimise the asset management of RATP's infrastructures.* Transport Research Arena 2014, Paris. 10 p.

**Peyras L.** (2003). *Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages, développement de méthodes d'aide à l'expertise*. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont 2, 199 p.

**Picand, S.** (2010). *Prise en charge des risques des projets de développement à caractère innovant. Proposition d'un outil de mise en œuvre dans l'industrie mécanique*. Thèse de Doctorat, ENSAM. Disponible à l'URL : http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00006221/fr/.

**Pitton J.** (1996). *RELIASEP - A technique for safe design*, Product Assurance Symposium and Software Product Assurance Workshop, 19-21/03/1996, Noordwijk, the Netherlands.

**Pomerol, J.C., Barba-Romero, S.** (1993). *Choix multicritère dans l'entreprise*. Hermès, Paris.

**Price C. J., Taylor N. S.** (2001). *Automated multiple failure FMEA*. Reliability engineering and systeme safety, n°76, pp. 1-10

**Quidu, I., Malkasse, J.P., Vilbé, P., Burel, G.** (2001). *Fusion multi-attributs d'images sonar*. GRETSI. Toulouse, France.

**RATP**, (2010). *Référentiel des biens immobilisés*. Document interne RATP.

**Rhayma, A., Talon, A., Breul, P., Goirand, P.,** (2013). *Méthodologie de notation des ouvrages souterrains RATP*. 31èmes Rencontres Universitaires de l'AUGC. 10 p.

**Roberts, F.S.** (1979). *Measurement Theory with Applications to Decision Making, Utility, and the Social Sciences*. Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts.

**Rogers M., Bruen M., Maystre L.Y.** (2000). *ELECTRE and Decision Support. Methods and applications in Engineering and Infrastructure Investment*. Kluwer Academic Publishers.

**Ross D., Schoman K.** (1977). *Structured analysis for requirements definition*, IEEE Transactions on Software, vol. SE-3, p. 6-15.

**ROY, B.** (1985). *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Paris, France : Economica, 423 p.

**Roy, B.** (1997). *L'aide à la décision aujourd'hui : que devrait-on en attendre ?* Document de LAMSADE N° 104, Université de Paris Dauphine, France.

**Roy, B.** (2009). *À propos de la signification des dépendances entre critères : quelle place et quels modes de prise en compte pour l'aide à la décision ?*, (3), RAIRO-Oper. Res. 43, pages 255-275.

**Roy, B., Bouyssou, D.** (1993). *Aide multicritère à la décision : méthodes et cas*. Editions Economica, Paris, 695 p.

**Rysak, Q.** (2013). *Création d'une base de données et analyse statistique des ouvrages d'art comme outil d'aide à la programmation de la maintenance*. Document interne RATP.

**Sanchez, C.** (2007). *Spécification et Implémentation du Système d'Aide à la Décision Multicritère pour la Maintenance Préventive et la Gestion du Patrimoine de la Société d'Autoroute ESCOTA : le projet SINERGIE*. Rapport de thèse, Université de Mines ParisTech, 174 p.

**Saaty, T.L.** (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York, 287 p.

**Schärlig, A.** (1985*). Décider sur plusieurs critères : panorama de l'aide à la décision multicritère*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, CH, 300 p.

**Schärlig, A.** (1996). *Pratiquer Electre et Prométhée, un complément à Décider sur plusieurs critères*. Lausanne : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 173 p.

**Serre, D.** (2005). *Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations, modélisation de critères de décision dans un Système d'Information Géographique*. Rapport de thèse, Université de Marne la Vallée, 225 p.

**Serre, D., Peyras, L., Tourment, R., Diab, Y.** (2008). *Levee Performance Assessment Methods Integrated in a GIS to Support Planning Maintenance Actions.* Journal of Infrastructure Systems. American Society of Civil Engineers, 13 p.

**STIFF** (2006). *Enquêtes qualitatives et quantitatives visant à évaluer les projets de fiabilisation des radiales ferrées en Île-de-France*.

**SDM** (2009). *Schéma Directeur de la Maintenance*. RATP. Document interne.

**SETRA** (1996). *IQOA (Image de la Qualité des Ouvrages d'Art) Guide de visite en subdivision*. Référence F 9630 PV, Bureau de vente du SETRA, 1996, 17 pages.

**Sianipar P. R. M., Adams T. M.** (1997*). Fault-tree model of bridge element deterioration due to interaction*. Journal of infrastructure system, september 1997, Issue 3, pp. 103-110

**SNCF** (1975). *Ouvrages d'Art. Construction des tunnels anciens en maçonnerie*. 88 p.

**STIF** (2012). *Le Syndicat des Transports d'Île-de-France et la Régie Autonome des Transports Parisiens*.

**Suciu, I., Linhares, M., Mirouze, F., Stephany, V.** (2013). *Benchmark on inspection and maintenance of structural assets*. RATP (document interne, non publié).

**Tacnet, J-M., Batton-Hubert, M., Dezert, J.** (2010). *Analyse multicritère et fusion d'information pour l'expertise et la gestion integrée des risques naturels en montagne*. Colloque Lambda Mu. La Rochelle, France: 10 p.

**Talon, A., Boissier, D., Lair, J.** (2007). *Service life assessment of building components: Application of evidence theory*. Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 35, n° 3, p. 66-70.

**Talon, A., Boissier, D., Peyras, L.** (2014). *Méthodes qualitatives pour la Sûreté de Fonctionnement des structures et des ouvrages*. 8èmes Journées Fiabilité des Matériaux et des Structures. Aix-en-Provence, 9 et 10 avril 2014. 15 p.

**Tardieu, H., Rochfeld, A., Colletti, R.** (2003). *La méthode Merise : Principes et outils, t. 1.* Paris, Editions d'organisation.

**Tea, C** (2012). *REX et données subjectives : quel système d'information pour la gestion des risques ?* Numéro 2012-14 des Cahiers de la Sécurité Industrielle, Fondation pour une Culture de Sécurité Industrielle, Toulouse, France (ISSN 2100-3874).
Disponible à l'URL http://www.FonCSI.org/fr/cahiers/

**Travé-Massuyès L., Dague P., Guerrin F.** (1997). *Le raisonnement qualitatif pour les sciences de l'ingénieur*. Paris: Hermes, 505 p.

**Tricoire, J.** (1999). *Le métro de Paris, 1899-1911, Images de la construction*. Editions des musées de la Ville de Paris.

**Trouillet, P.** (2000). *Suivi préventif des ponts autoroutiers du réseau concédé*. Actes du Colloque Risque et Génie Civil, Paris UNESCO, 8-9 novembre 2000, Presses de l'ENPC, n° ISBN 2-85978-334-2, pp. 553-561.

**Valadas E.** (2003). *Identification des scénarios de dégradations des chaussées bitumineuses épaisses*. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en génie civil, CUST, Université Blaise Pascal Clermont 2, 148 p.

**Vallee D., Zielniewicz P.** (1994). *ELECTRE III – IV, version 3.x, aspects méthodologiques*. Paris, France : Lamsade, Université Paris 9 – Dauphine, 146 p.

**Vasconcelos E., Breysse D., Desmulliez J. J.** (2004). *Démonstrateur d'un outil d'aide à la gestion du patrimoine réseaux d'assainissement non visitable*. In: 22ème Rencontres Universitaires de Génie Civil, Université de Marne la Vallée, France, juin 2004. pp. 8.

**Villemeur A.** (1988). *Sûreté de Fonctionnement des systèmes industriels. Fiabilité – Facteurs humains - Informatisation*. Editions Eyrolles, 121-141 p.

**Vincke, P.** (1989). *L'aide multicritère à la décision*. Editions Ellipses, Bruxelles, 179 p.

**Von Neumann, J., Morgenstern, O.** (1944). *Theory of games and economic behavior*. Princeton University Press, Princeton,, 776 p.

**Vuillet M.** (2012). *Elaboration d'un modèle d'aide à la décision basé sur une approche probabiliste pour l'évaluation de la performance des digues fluviales*. Rapport de thèse, Université Paris-Est, 186 p.

**Vuillet, M., Carvajal, C., Peyras, L., Diab, Y.** (2014). *Application des probabilités subjectives pour la prise en compte des incertitudes issues de dires experts en analyse de risques*. 8èmes Journées Fiabilité des Matériaux et des Structures. Aix-en-Provence, 9 et 10 avril 2014. 13 p.

**World Bank** (1988). *Road Deterioration in Developing Countries : Causes and Remedies, Washington*, Ed. The World Bank, 61 p.

**Zwingelstein G.** (1995). *Diagnostic des défaillances. Théorie et pratique pour les systèmes industriels*. Paris: Hermès Editions, 601 p.

**Zwingelstein G.** (1996). *La maintenance basée sur la fiabilité. Guide pratique d'application de la RCM*. Paris: Hermès Editions, 666 p.

**Zwingelstein G.** (2009). *Sûreté de Fonctionnement des systèmes industriels complexes. Analyse prévisionnelle et bases de données de fiabilité*, Technique de l'Ingénieur, vol. S8253, p. 1-19.

# Liste des tableaux

# Liste des figures

# Liste des annexes

# Annexes

# Annexe 1. Les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement

Dans cette annexe, nous présentons une synthèse des méthodes de la Sûreté de Fonctionnement en examinant leur intérêt dans le contexte de la gestion patrimoniale. Nous nous basons sur la thèse de (Serre, 2005).

## A1.1 Les méthodes qualitatives

Certaines méthodes sont qualitatives et visent à identifier les risques ou les modes de défaillance. On trouve l'***Analyse Préliminaire des Dangers***, l'***Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets*** (AMDE) et la ***Méthode des Combinaisons de Pannes Résumées***.

### A1.1.1 L'Analyse Préliminaire des Dangers (APD)

L'APD est utilisée dans les premières phases de conception d'un système et constitue un premier outil d'identification des risques potentiels. Elle est mise en œuvre en préliminaire d'une étude de Sûreté de Fonctionnement plus fine, telle une analyse AMDE.

L'identification des dangers est effectuée à partir de la connaissance et de l'expérience des experts. L'approche peut être déductive (recherche des causes d'une défaillance) ou inductive (recherche des effets d'une défaillance), selon que l'analyse est réalisée avec l'accident potentiel ou avec l'élément dangereux (VILLEMEUR, 88).

L'APD consiste à rechercher les entités dangereuses, les situations dangereuses et les accidents potentiels en découlant. Les résultats obtenus sont présentés dans un tableau A1-1.

| système | phase | entités dangereuses | événement causant une situation dangereuse | situation dangereuse | accident potentiel | effet | gravité | mesure préventive |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | |

*Tableau A1-1: Tableau de l'Analyse Préliminaire des Dangers*

***Cette méthode ne présente pas d'intérêt pour les barrages car les modes de défaillance ou de rupture sont généralement bien identifiés. Ainsi, l'analyse du fonctionnement de ces ouvrages relève d'études de sûreté plus fines, telle que l'AMDE.***

### A1.1.2 Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE)

La méthode AMDE (Failure Modes and Effects Analysis) est apparue dans les années 1960 dans l'aéronautique et est actuellement une des méthodes de la Sûreté de Fonctionnement la plus universellement utilisée dans l'industrie (spatiale, nucléaire, automobile…). Cette méthode fait l'objet de nombreux guides et normes, généralement mis au point pour chaque contexte industriel particulier : NF X 60-510, CEI 812-1985, MIL-STD-1269 A.

L'AMDE est une méthode inductive d'analyse des défaillances potentielles d'un système. Elle considère, systématiquement, l'un après l'autre, chaque composant du système et analyse ses modes de défaillance (un mode de défaillance est la non réalisation d'une fonction quelconque dans des conditions prévues : pas, perte ou dégradation d'une fonction, fonction intempestive (ISDF)) et leurs effets.
Les résultats des analyses AMDE sont présentés sous forme de tableaux, spécialement conçus pour le type de système étudié. Le déroulement d'une AMDE comprend (VILLEMEUR,88) :

- Une analyse fonctionnelle du système ;
- La recherche systématique des modes de défaillance et de leurs causes ;

- La recherche des effets des modes de défaillance ;
- Dans la méthode AMDEC (AMDE avec analyse de la Criticité), on recherche en plus la probabilité et la gravité de chaque mode de défaillance qui permettront de caractériser sa Criticité. Le plus souvent, la criticité est renseignée de façon qualitative à l'aide du jugement de l'expert (Leroy, 92).

La chronologie des études AMDE répond à une logique de production industrielle, dans laquelle on essaie d'éliminer les défaillances liées aux phases de fabrication : les défauts de conception et de réalisation et les écarts par rapport aux normes et règles d'hygiène et sécurité. Elle comprend généralement trois analyses (fig. A1-1) (ISDF) :

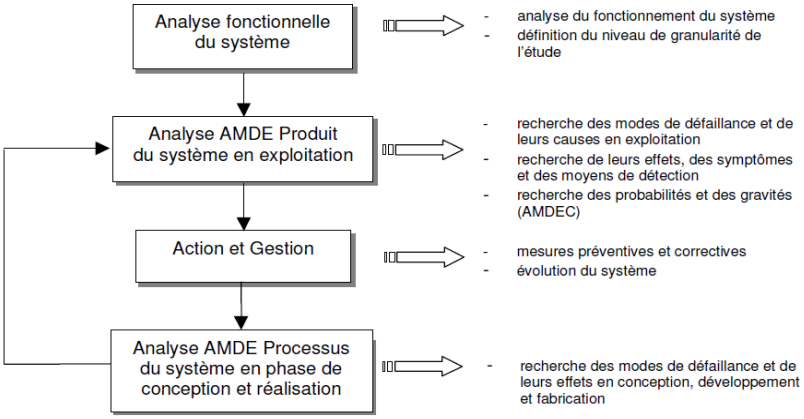



*Figure A1-1 : Processus générale de l'AMDE*

- L'***AMDE Produit*** est en principe réalisée en première phase : elle vérifie que le système assure en phase d'exploitation de façon satisfaisante les fonctions pour lesquelles il est conçu.
- L'***AMDE Processus*** examine si le produit obtenu est bien conforme à ce qui est prévu. Elle identifie les modes de défaillance liés à la conception et à la réalisation du système.
- L'***AMDE Moyen*** est parfois réalisée pour rechercher les moyens à mettre en œuvre.

***L'AMDE est une méthode puissante pour améliorer la Sûreté de Fonctionnement d'un système. Elle permet de générer une base d'informations qui sert de support pour définir, améliorer, corriger et valider un produit tout le long de sa vie, depuis sa conception jusqu'à l'exploitation.***

### *A1.1.3 La Méthode des Combinaisons de Pannes Résumées (MCPR)*

Les analyses AMDE mettent en évidence les défaillances simples du système. Pour prendre en compte la combinaison des modes de défaillance, la méthode MCPR intervient après une étude AMDE en la complétant. Elle recherche de façon inductive les combinaisons de défaillances élémentaires aboutissant à des effets indésirables.

***La méthode MCPR pourrait présenter un intérêt pour le génie civil, en complément de la réalisation d'une AMDE. En effet, les événements indésirables (les modes de rupture) sont complexes et liés à des combinaisons de plusieurs modes de défaillance des composants (fig. A1-2).***

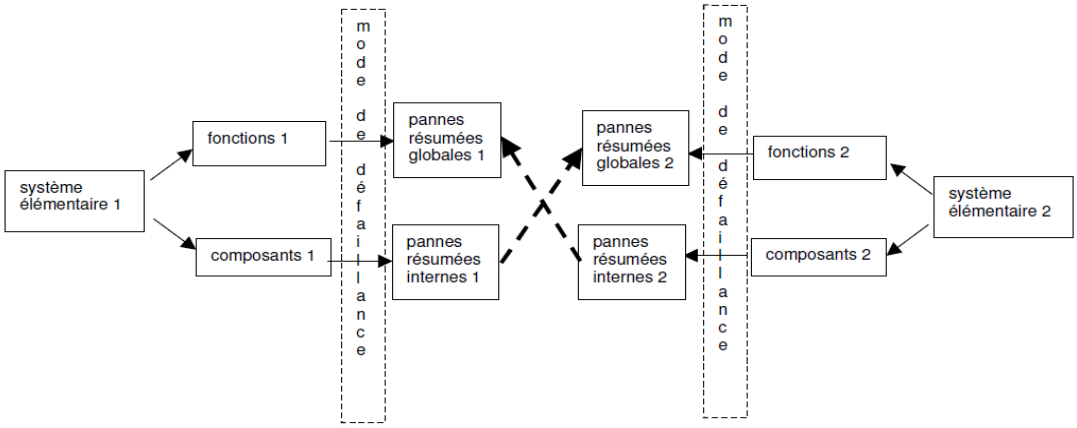



*Figure A1-2 : Démarche de la MCPR*

Toutefois, nous verrons d'autres méthodes plus intéressantes pour combiner les modes de défaillance, qui permettront en outre de prendre en compte les dégradations progressives et non chronologiques.

## A1.2 Les méthodes quantitatives

Ces méthodes visent, outre l'identification des risques, à produire des mesures de la Sûreté de Fonctionnement. Les principales sont la Méthode de l'Arbre des Causes (MAC) et la Méthode des Arbres d'Evénements (MAE). D'autres méthodes sont destinées à simuler le fonctionnement dynamique d'un système : la Méthode de l'Espace des Etats, les réseaux de Petri stochastiques et les simulations de Monte Carlo.

### A1.2.1 La Méthode des Arbres d'Evénements (MAE)

La Méthode des Arbres des Défaillances, parfois appelée la méthode de l'Arbre des Causes, est une méthode déductive : l'événement indésirable est situé au sommet de l'arbre et on déduit les événements intermédiaires et de base (fig. A1-3). Chaque niveau d'événements est relié en cascade à l'aide de symboles correspondant à des opérateurs qualitatifs (max, et, ou, si...) (Villemeur, 1988).

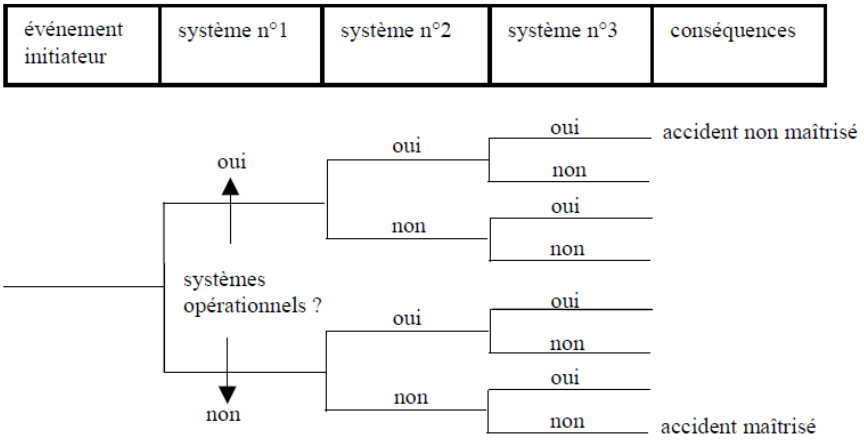



*Figure A1-3 : Structure d'un arbre d'événements (Zwingelstein, 96)*

Pour construire les arbres d'événements, il convient tout d'abord de définir les fonctions de sûreté du système et les événements initiateurs. Deux approches sont alors possibles :

- Une approche déductive basée sur la construction d'un arbre d'événements à partir de la fonction de sûreté considérée. Cette approche fait appel à la méthode MAC ;
- Une approche inductive basée sur une analyse MCPR (ou AMDE), qui permet de déterminer les événements initiateurs et les événements de chaque séquence.

***La MAE n'est pas particulièrement bien adaptée au contexte du génie civil : les défaillances des ouvrages et de leurs composants sont rarement binaires ni chronologiques, mais plutôt progressives, bouclées et redondantes.***

***La MAE peut toutefois présenter un intérêt dans les études de Sûreté de Fonctionnement pour l'analyse quantitative de scénarios de défaillance pouvant conduire à la rupture. Dans ce contexte, l'approche inductive doit être privilégiée et précédée obligatoirement d'une AMDE.***

### *A1.2.2 La Méthode des Arbres des Causes (MAC)*

La MAC (parfois appelée la *méthode de l'Arbre de Défaillances*) est une méthode déductive : on part de l'événement indésirable situé au sommet de l'arbre (Top Event) et on déduit les événements intermédiaires et de base. Chaque niveau d'événements est relié en cascade à l'aide de symboles correspondant à des opérateurs logiques (et, ou, si...).

L'élaboration des arbres des causes a souvent été considérée comme un art pratiqué par l'analyste. (Villemeur, 88) propose des éléments méthodologiques pour conduire une analyse MAC mais souligne les difficultés à s'assurer de l'exhaustivité des modes de défaillance. A ce titre, il propose l'application préalable d'une AMDE pour éviter les oublis lors de la construction des arbres.

La figure A1-4 issue de (CEA,00) représente un arbre des causes appliqué à la défaillance d'un générateur de secours commandant un évacuateur de crues vanné, en situation de coupure électrique.

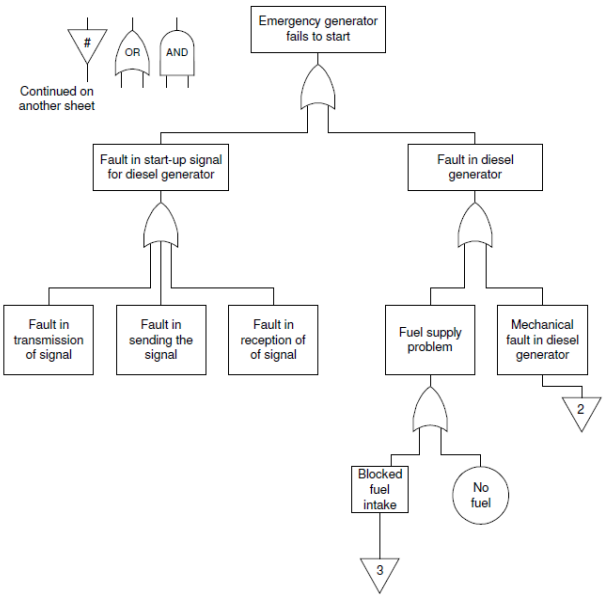



*Figure A1-4 : Arbre des causes appliqué à un générateur de secours (CEA, 00)*

***En synthèse, la méthode MAC présente les mêmes inconvénients que la MAE dans le contexte du génie civil : logique binaire, défaillances chronologiques. En outre, sa méthodologie de mise en œuvre apporte un formalisme insuffisant pour nos objectifs de structuration et de classement des phénomènes.***

### *A1.2.3 La Méthode de l'Espace des Etats (MEE)*

La MEE ou la *méthode des processus de Markov*, consiste à représenter le comportement d'un système par un ensemble de composants pouvant se trouver dans un nombre fini d'états de fonctionnement. La combinaison de l'ensemble des états de fonctionnement des composants donne l'état du système à un instant donné (fig. A1-5).

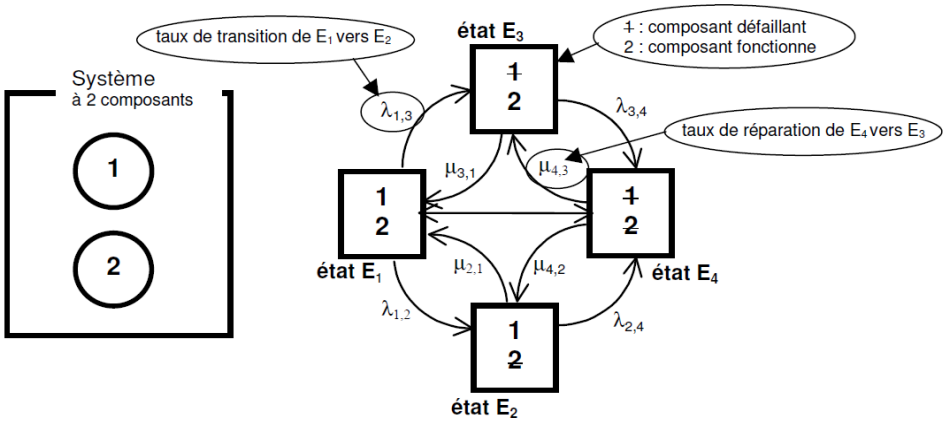



*Figure A1-5 : Graphe d'état d'un système à deux composants et deux états possibles (marche ou défaillant) (Leroy et al., 1992)*

Pour un ouvrage de génie civil, tel que les tunnels maçonnés, constitué de nombreux composants susceptibles de connaître plusieurs états de dégradation progressifs, les transitions à étudier deviennent rapidement très importantes, rendant la méthode inutilisable (données disponibles insuffisantes, complexité des mécanismes en jeu, etc.).

### *A1.2.4 Les réseaux de Petri stochastiques*

Cette méthode utilise une représentation sous forme de graphes orientés marqués, indiquant les états (ou les places) des composants du système et les transitions entre chaque place, associées à un délai régi par une loi (déterministe ou probabiliste) (fig. A1-6).

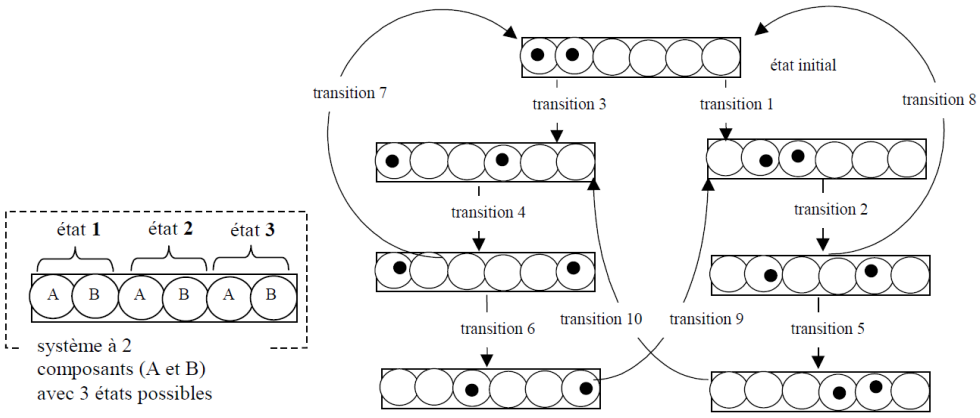



*Figure A1-6 : Exemple de réseau de Petri pour un système à deux composants et trois états possibles (Leroy et al., 1992)*

***Même s'il est possible d'imaginer la conception d'un réseau de Petri stochastique pour un ouvrage du génie civil particulier, les limites de la méthode apparaissent dès lors que le système à étudier est complexe et qu'on envisage plusieurs états de dégradation : nombres de places et de transitions très importantes, lourdeur du graphe, etc.***

### *A1.2.5 Les simulations de Monte Carlo*

**Les simulations de Monte Carlo** sont utilisées lorsque le système à étudier est trop complexe. Dans ce cas, les méthodes du processus de Markov ou des réseaux de Petri stochastiques ne permettent pas un traitement correct sans approximations grossières ou mal maîtrisées. On préfère alors la simulation de Monte Carlo. Deux conditions sont nécessaires :

- Disposer d'un modèle de comportement du système étudié capable de reproduire de manière correcte son fonctionnement et son évolution au cours du temps lorsqu'il est soumis à différents aléas. Ces modèles sont souvent connus d'une manière déterministe pour les systèmes mécaniques simples. Ceci n'est pas le cas pour les tunnels maçonnés.
- Disposer d'un logiciel de simulation de Monte Carlo pour effectuer des tirages aléatoires des variables d'entrée (état du système), pour réaliser des histoires du système à partir de son modèle de comportement et pour analyser statistiquement les variables de sortie.

***De plus, dans le contexte du génie civil, cette méthode nécessite des informations particulièrement difficiles à obtenir, voire impossible (lois de variables, modèle de comportement).***

# Annexe 2. Les méthodes d'aide à la décision multicritère

Dans cette annexe nous présentons une synthèse des différentes méthodes d'aide à la décision multicritère susceptibles d'être appliquées à notre problématique. Cette synthèse se fonde sur la thèse de (Vuillet, 2012).

## A2.1 Les méthodes du critère unique de synthèse (Keeney, 1976 ; Saaty, 1980)

***Principes***

Les méthodes proposant la construction d'un critère unique de synthèse sont les plus anciennes méthodes multicritère. Développées au départ principalement pour des problèmes économiques, elles avaient pour objectif le calcul et la comparaison des rapports coûts/bénéfices des actions qui s'offrent à un décideur. On parle d'utilité multi attribut par analogie aux théories développées en économie (Von Neumann et Morgenstern, 1944).

Cette famille de méthodes conduit à résumer la valeur de toute action *a* par une note globale *U(a)* calculée à partir de son vecteur de performance, c'est-à-dire des évaluations de l'action *a* selon chaque critère. Cette note vise à résumer la valeur globale de l'alternative et sert de base à la comparaison multicritère des actions (Grabisch et *al*., 2002).

La construction du critère unique de synthèse consiste à agréger des vrais critères en une fonction unique. Les travaux relatifs à cette famille étudient les conditions mathématiques d'agrégation et les formes particulières de la fonction d'agrégation.

La théorie du critère unique de synthèse mesure la satisfaction d'un décideur par une fonction mathématique, la fonction d'utilité. Selon (Vincke, 1989), la théorie de l'utilité multi attribut a surtout été développée dans le cas incertain et fait largement usage des probabilités pour représenter les phénomènes d'imprécision et d'incertitude qui peuvent apparaître dans un problème d'aide à la décision. Nous remarquons que ces méthodes ont été également mises en œuvre sous format flou (Quidu *et al.*, 2001).

***Formulation***

Soit :

- *A* l'ensemble des actions parmi lesquelles le décideur doit choisir ;
- *C* l'ensemble des critères permettant d'évaluer les alternatives, avec $g_i(a)$ l'évaluation de l'action *a* par le critère $g_i$ ;
- *D* l'univers de description des degrés de satisfaction ou d'évaluations partielles. Pour des raisons de simplification des notations, on prend *D* = [0 , 1], indiquant que les valeurs des scores sont exprimées dans l'intervalle [0, 1] : 1 correspond à la satisfaction complète d'un critère, 0 exprime l'insatisfaction complète.

A chaque action *a* de l'ensemble *A* $(a \in A)$ est associé un profil tel que :
$a_1 = (g_1(a_1), g_2(a_1)\ldots, g_m(a_1))$
où $g_i(a_n)$ correspond à l'évaluation partielle de l'action $a_n$ selon le critère $g_i$.

Le principe de ce type de méthode est de construire une fonction d'utilité $U$ :
$[0, 1]^p \Rightarrow [0, 1]$
telle que, pour chaque alternative de l'ensemble $A$ $(a_1, a_2, \ldots, a_n)$, on ait :
$U(a_1) = U(g_1(a_1), g_2(a_1) \ldots, g_m(a_1))$,
où $U(a)$ représente l'évaluation globale de l'action $a$ relativement à tous les critères, et $U$ est la fonction d'utilité constituée d'un ou plusieurs opérateur(s) d'agrégation à déterminer.

Les actions de l'ensemble $A$ peuvent ensuite être classées relativement à leur score de synthèse $U(a_n)$.

Les conditions nécessaires sur la fonction $U$ sont les suivantes :

- $U$ est continu ;
- $U(0, 0, \ldots, 0) = 0$ et $U(1, 1, \ldots, 1) = 1$ ;
- $\forall$ $(g_m(a_1), g_m(a_2))$ $\in$ $[0, 1]^2$, si $g_m(a_1) \geq g_m(a_2)$ alors $U(g_1(a_1), g_2(a_1) \ldots, g_m(a_1)) \geq U(g_1(a_2), g_2(a_2), \ldots, g_m(a_2))$

### A2.1.1 Les méthodes MAVT (Multiple Attribut Value Theory), et MAUT (Multiple Attribut Utility Theory) (Keeney et al., 1976)

La *méthode MAVT* repose sur l'idée fondamentale suivante : tout décideur essaie inconsciemment (ou implicitement) de maximiser une fonction $V = V[g_1, \ldots, g_n]$ qui agrège tous les critères. Sa particularité réside dans la construction d'une fonction de valeur partielle pour chaque critère. Ces fonctions partielles sont construites en interrogeant le décideur, qui donne ses préférences sur une échelle de 0 à 1, où la meilleure action sur un critère aura une valeur partielle égale à 1, et 0 la pire. Elles consistent en une transformation monotone de chaque critère initial de façon à prendre en compte la non-linéarité des préférences du décideur sur les échelles d'évaluation des critères. L'homme d'étude construit ensuite la fonction de valeur $V$, selon les caractéristiques des préférences du décideur.

La méthode MAVT s'applique dans un contexte caractérisé par un ensemble d'actions explicite, une articulation a priori des préférences et un univers déterministe où les évaluations des actions par rapport à chaque critère sont certaines.

La mise en œuvre de la méthode MAVT se déroule comme suit (Hammami, 2003) :

- Etape 1 : évaluer chacune des actions selon chaque critère (construire la matrice de performance) ;
- Etape 2 : construire des fonctions de valeur partielles pour chaque critère sur une échelle de 0 à 1 (traduire la matrice des performances dans les valeurs des fonctions partielles) ;
- Etape 3 : établir les poids des critères ;
- Etape 4 : calculer l'évaluation globale pour chaque action en utilisant une forme d'agrégation appropriée : $V[g_1(a), \ldots, g_n(a)] = f\{v_1[g_1(a)], \ldots, v_n[g_n(a)]\}$ ;
- Etape 5 : déterminer la meilleure action, celle qui maximise le plus grand score ;
- Etape 6 : faire des analyses de sensibilité.

***Exemple de mise en œuvre de la méthode MAVT (Pomerol et Barba-Romero, 1993):***
Il s'agit de choisir des voitures en fonction de leur prix, leur confort et leur consommation d'essence.

- Etape 1 : évaluer chacune des actions selon chaque critère (tableau A2-1) ;

| Action | Prix (Min) | Confort (Max) | Consommation (Min) |
|---|---|---|---|
| a | 100 | 10 | 12 |
| a | 90 | 9 | 9 |
| a | 80 | 9 | 10 |
| a | 75 | 8 | 8 |
| a | 70 | 9 | 11 |
| a | 70 | 7 | 7 |
| a | 60 | 6 | 9 |
| a | 60 | 6 | 9 |
| a | 50 | 5 | 7 |
| a | 50 | 4 | 6 |

*Tableau A2-1 : Matrice de performance des critères de comparaisons des voitures (Pomerol et Barba-Romero, 1993)*

- Etape 2 : construire des fonctions de valeur partielles pour chaque attribut (ou critère). L'homme d'étude pose plusieurs questions au décideur construisant ainsi des fonctions de valeurs partielles. Par exemple, pour construire la courbe $V_1$ relative au prix, on retient que $V_1(100) = 0$ et $V_1(50) = 1$. L'homme d'étude pose ensuite des questions au décideur comme « combien êtes-vous prêt à donner en consommation pour être indifférent entre (50, 7, 9) et (75, 8, ?) » ; « Où se situe le prix tel que (50, 7, 9) ≈ (?, 8, 6) et (?, 7, 9) ≈ (100, 8, 6)? », etc. A partir des réponses à ces questions, il est possible de construire la courbe $V_1$. Les courbes de valeur partielle des attributs *prix* ($V_1$), *confort* ($V_2$) et *consommation* ($V_3$) sont présentées dans la figure A2-1.

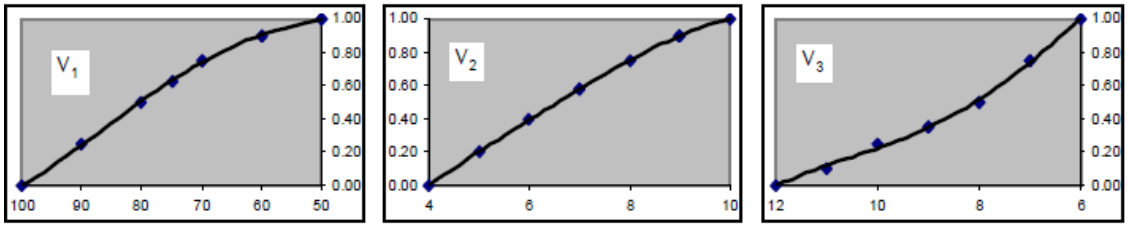



*Figure A2-1 : Courbes de valeur partielle (Pomerol et Barba-Romero, 1993)*

- Etape 3 : établir les poids $\pi_i$ des critères ($\pi_1 = 0{,}32$ ; $\pi_2 = 0{,}36$ ; $\pi_3 = 0{,}32$).
- Etape 4 : calculer l'évaluation globale pour chaque action en utilisant une forme d'agrégation appropriée (tableau A2-2).

  Exemple : la forme d'agrégation additive :

  $V(a) = \pi_1 x V_1(a) + \pi_2 x V_2(a) + \pi_3 x V_3(a)$

| Action | Prix | V | Confort | V | Consommation | V | V |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $a_1$ | 100 | 0,00 | 10 | 1,00 | 12 | 0,00 | 0,360 |
| $a_2$ | 90 | 0,25 | 9 | 0,90 | 9 | 0,35 | 0,516 |
| $a_3$ | 80 | 0,50 | 9 | 0,90 | 10 | 0,25 | 0,564 |
| $a_4$ | 75 | 0,62 | 8 | 0,75 | 8 | 0,50 | 0,628 |
| $a_5$ | 70 | 0,75 | 9 | 0,90 | 11 | 0,10 | 0,596 |
| $a_6$ | 70 | 0,75 | 7 | 0,58 | 7 | 0,75 | 0,688 |
| $a_7$ | 60 | 0,90 | 6 | 0,40 | 9 | 0,35 | 0,544 |
| $a_8$ | 60 | 0,90 | 6 | 0,58 | 9 | 0,50 | 0,656 |
| $a_9$ | 50 | 1,00 | 5 | 0,20 | 7 | 0,75 | 0,632 |
| $a_{10}$ | 50 | 1,00 | 4 | 0,00 | 6 | 1,00 | 0,640 |

*Tableau A2-2 : Evaluation globale des actions (Pomerol et Barba-Romero, 1993)*

- Étape 5 : déterminer la meilleure action, dans ce cas d'étude, en fonction de son score global. Le classement de actions est : $a_6 > a_8 > a_{10} > a_9 > a_4 > a_5 > a_3 > a_7 > a_2 > a_1$

La *méthode MAUT* reprend les mêmes principes que la méthode MAVT, mais elle s'applique dans le cas où les évaluations des actions par rapport aux critères font l'objet d'incertitudes. Dans ce cas, on parle de fonction d'utilité *U* et non plus de fonction de valeur *V*. On bâtit alors des fonctions d'utilité qui prennent en compte la mauvaise connaissance sous format probabiliste. Les étapes de construction sont les mêmes que celles de la méthode MAVT.

***Exemple de mise en œuvre de la méthode MAUT (Tea, 2012):***
La méthode MAUT a été appliquée à l'analyse d'un changement de réglementation concernant la conduite des trains SNCF en cas d'alerte radio. Avant toute modification du référentiel, la SNCF a pour obligation de démontrer que le niveau de sécurité du transport ferroviaire est maintenu au moins au même niveau. En France, dans le secteur ferroviaire, toute modification ayant un impact sur la sécurité est soumise à un critère réglementairement instauré : le principe du GAME (Globalement Au Moins Équivalent) pour assurer qu'une modification (de règlement ou autre) ne dégrade pas la sécurité.

La finalité de la méthode MAUT est de retranscrire la perception subjective des risques des décideurs pour comparer deux réglementations de sécurité (l'IN2912 et la S2B) sur trois critères : blessés légers (BL), blessés graves (BG), et morts (M). La détermination du niveau de sécurité s'appuie alors sur trois distributions de risques qu'il faut intégrer en un unique critère de synthèse. A cet effet, la théorie de l'utilité multi-attribut a été utilisée selon les étapes décrites dans la figure A2-2.

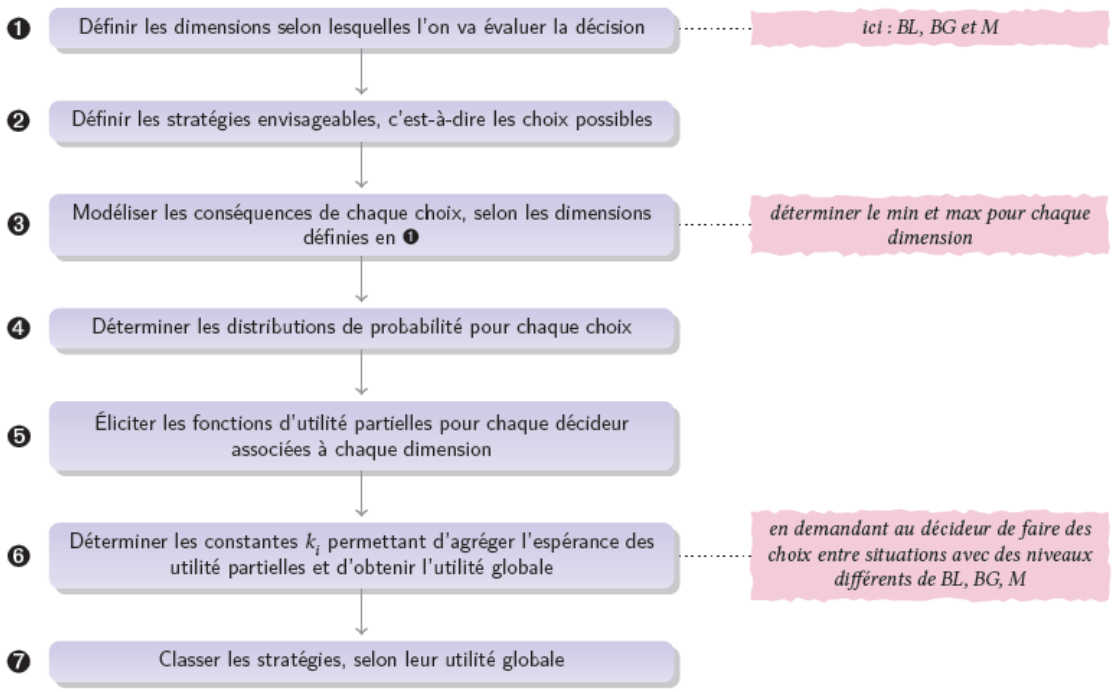



*Figure A2-2 : Les étapes de la méthode MAUT (Tea, 2012)*

Afin d'éliciter les paramètres subjectifs du niveau de sécurité selon la théorie multi-attribut, des entretiens individuels auprès de huit experts ont été réalisés au sein de la direction de la sécurité de la SNCF. Le paramétrage suivant est fondé sur une analyse de l'historique des événements ayant eu des conséquences :

- Nombre de blessés légers : [-500, 0]
- Nombre de blessés graves : [-100, 0]
- Nombre de morts : [-20, 0]
- Échelle d'utilité variant entre 0 (pour la pire conséquence $x^-$) et 1 (pour la situation jugée optimale $x^+$)

Dans cette étude, le logiciel SERUM utilise des méthodes d'élicitation fondées sur une succession de choix binaires à opérer, qui permettent :

- La reconstruction des *fonctions d'utilité* de la personne interviewée, suivant chaque attribut (suivant une interface du type de celle présentée à la figure A2-3) ;

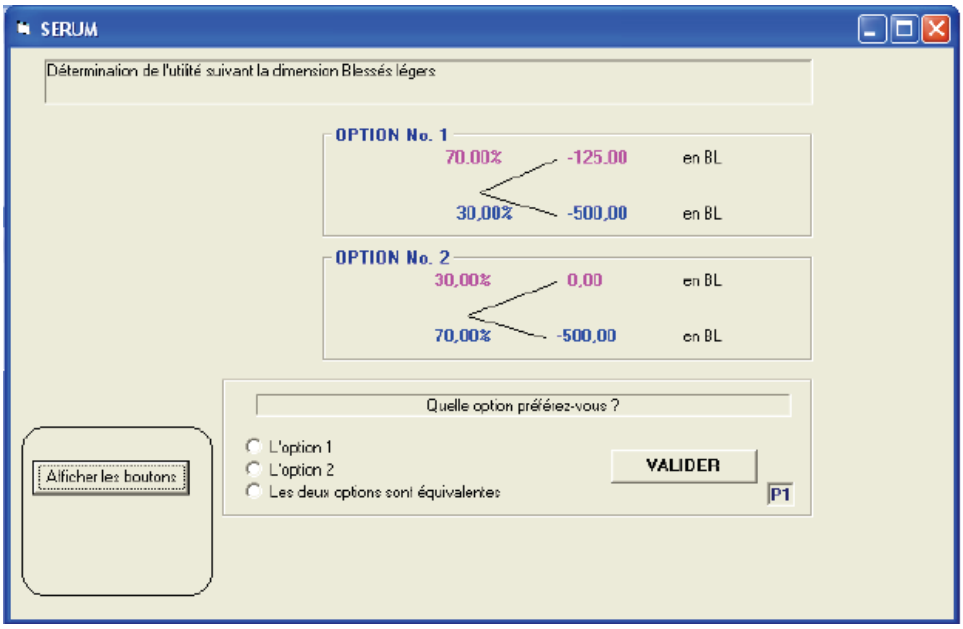



*Figure A2-3 : Exemple d'interface permettant d'éliciter une fonction d'utilité (Tea, 2012)*

- L'obtention des *coefficients d'échelles* (les $k_i$) traduisant la valorisation personnelle du blessé léger vis-à-vis du blessé grave et vis-à-vis du mort (suivant une interface du type de celle présentée figure A2-4).

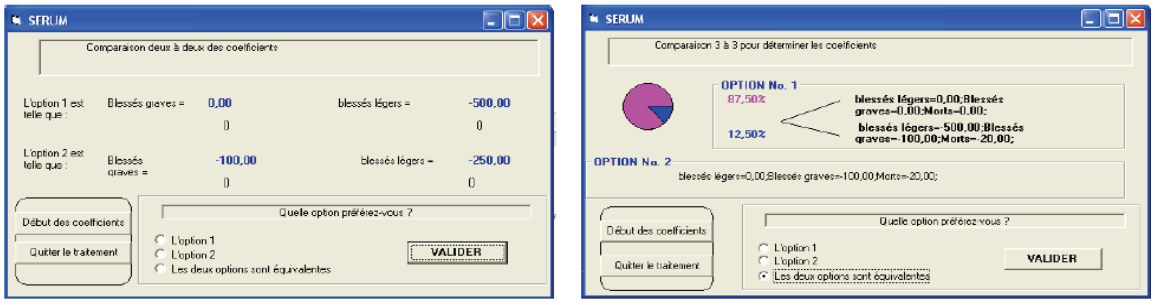



*Figure A2-4 : Exemple d'interface permettant l'élicitation des coefficients d'arbitrage (Tea, 2012)*

- Obtention des fonctions d'utilité élicitées (fig. A2-5)

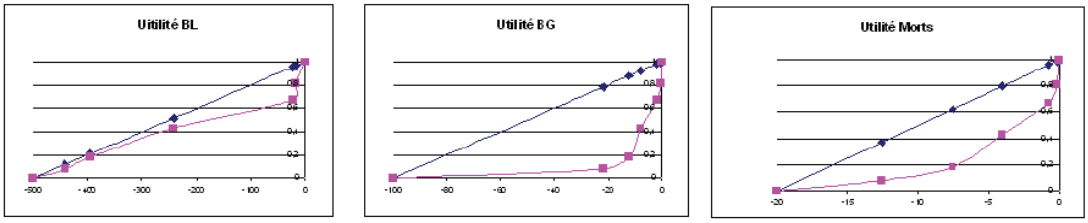



*Figure A2-5 : Exemple de fonction d'utilité élicitée (Tea, 2012)*

- Les constantes $k_i$ sont déterminées à partir des entretiens avec huit experts ($E_i$) (tableau A2-3) :

| Coefficient | E | E | E | E | E | E | E | E | Moyenne |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| k | 0,622 | 0,171 | 0,519 | 0,438 | 0,5 | 0,135 | 0,85 | 0,985 | **0,5275** |
| k | 0,503 | 0,171 | 0,519 | 0,436 | 0,499 | 0,135 | 0,85 | 0,985 | **0,51225** |
| k | 0,622 | 0,171 | 0,519 | 0,436 | 0,499 | 0,135 | 0,85 | 0,985 | **0,52713** |

*Tableau A2-3 : Résultats des élicitations (Tea, 2012)*

- Finalement, les résultats sont représentés dans la figure A2-6. L'étude conclut que les deux réglementations sont équivalentes pour tous les décideurs (le terme GAME (Globalement Au Moins Équivalent) indique que la modification de règlement ne dégrade pas la sécurité).

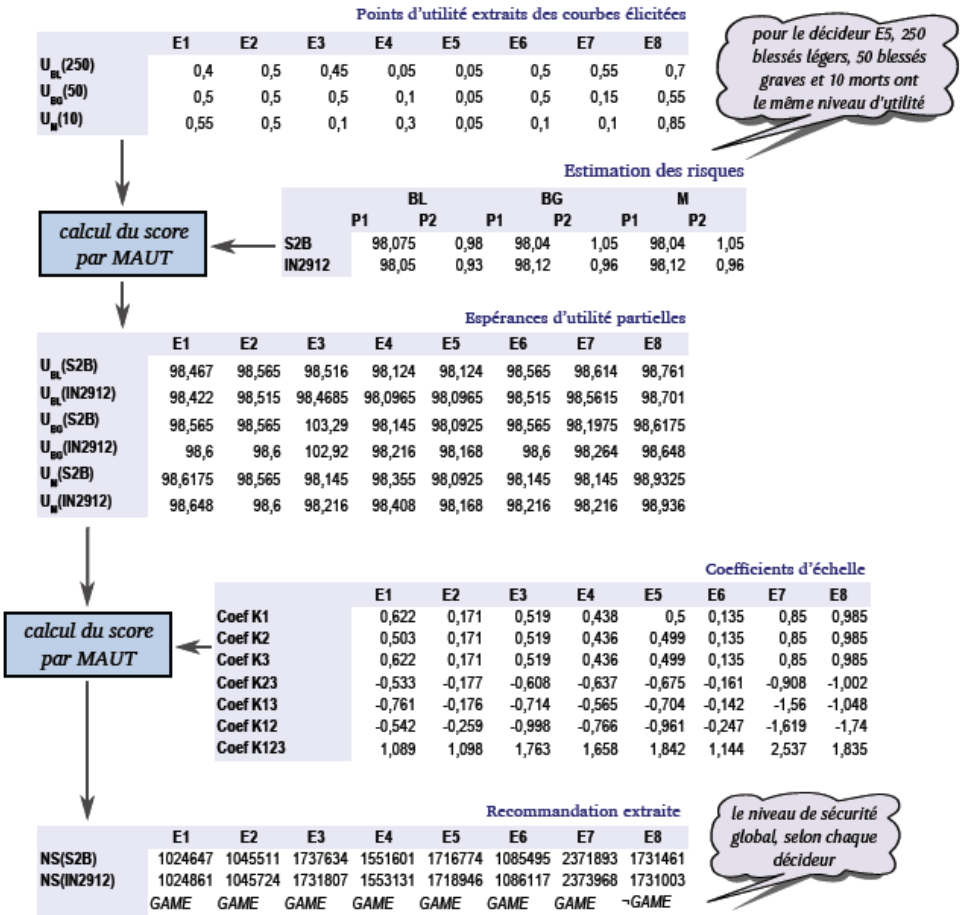



*Figure A2-6 : Récapitulatif de l'établissement de la recommandation (Tea, 2012)*

***Synthèse***

Les méthodes MAVT et MAUT présentent l'avantage de synthétiser l'ensemble des critères à partir d'une note représentative. Par contre, elles sont des procédures très exigeantes du point de vue informationnel. En outre, la construction des fonctions de valeur ou d'utilité n'est pas toujours une tâche évidente.

Ces méthodes exigent une articulation des préférences et une évaluation des actions sur des échelles cardinales. La structure de préférence est du type {P, I} (préférence ou indifférence).

Au contraire de la méthode MAVT, la méthode MAUT permet de modéliser les incertitudes des critères, sous format probabiliste ou flou. Pour un développement plus complet des théories de l'utilité et un historique de l'utilisation de la MAUT nous renvoyons le lecteur intéressé vers (Picand, 2010).

### A2.1.2 La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) et MACBETH (Bana e Costa et Vansnick, 1997)

La *méthode AHP* (Saaty, 1980) consiste à représenter un problème de décision par une structure hiérarchique (fig. A2-7) reflétant les interactions entre les divers éléments du problème et procède ensuite à des comparaisons par paire des éléments de la hiérarchie pour déterminer les priorités des actions.

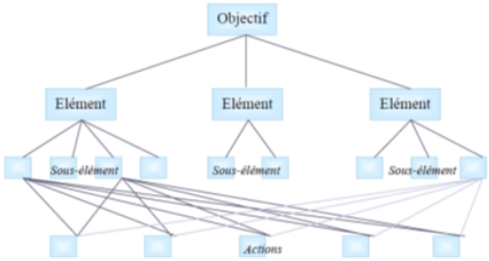



*Figure A2-7 : Structure hiérarchique d'un problème selon la méthode AHP (Hammami, 2003)*

La mise en œuvre de la méthode AHP se déroule comme suit (Hammami, 2003) : on décompose le problème en une hiérarchie d'éléments inter-reliés (critères, sous-critères, indicateurs d'état) ; au sommet de la hiérarchie, on trouve l'objectif et, dans les niveaux inférieurs, les éléments contribuant à atteindre cet objectif ; le dernier niveau est celui des actions. Une procédure de comparaison par paire permet d'attribuer un poids à chaque critère. L'agrégation se fait ensuite selon une somme pondérée.

***Exemple d'application de la méthode AHP (Tacnet et al., 2009) :***
La méthode a été mise en œuvre pour l'évaluation du risque lié aux avalanches. Le principe est basé, d'une part, sur la décomposition d'un problème de décision en critères ; d'autre part, sur la synthèse et l'agrégation de poids affectés aux critères des différents niveaux de la hiérarchie (fig. A2-8). Les préférences traduisant l'importance relative entre les critères s'expriment par des poids $w_j$.

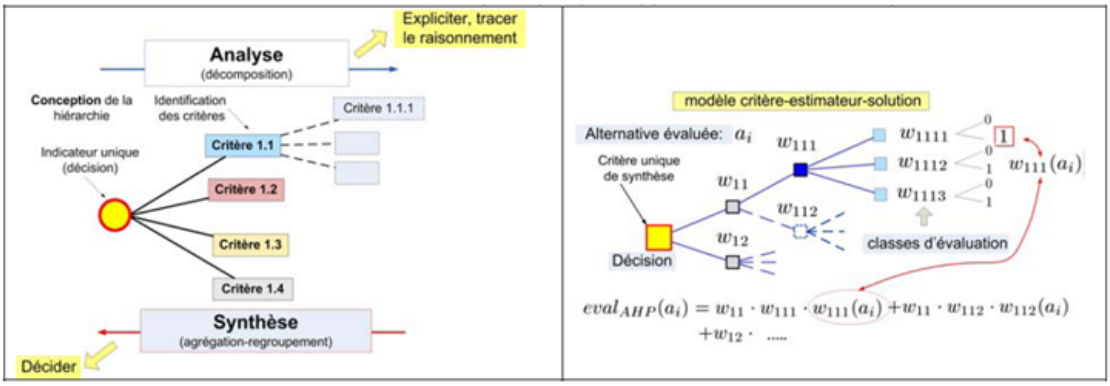



*Figure A2-8 : A droite, principe de l'AHP. A gauche, une forme adaptée pour agrégation dans un modèle critère-estimateur-solution (Tacnet et al., 2010)*

La méthode AHP suit une structure hiérarchique, relativement comparable aux mécanismes de dégradation des tunnels maçonnés. Nous remarquons cependant qu'elle ne fonctionne que pour un nombre limité d'actions (Vincke, 1989), ce qui la rend mal adaptée à la situation d'un patrimoine d'infrastructures (près de 9 000 ouvrages dans le cas du patrimoine RATP).

La méthode MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique) repose également sur une agrégation par somme pondérée (Bana e Costa et Vansnick, 1997). Le poids (ou attractivité) de chaque critère est déterminé par une procédure de questionnement spécifique du décideur, favorisant la prise en compte du jugement qualitatif de ses préférences. La méthode garantit une cohérence globale entre la construction des échelles des critères d'évaluation et l'identification des paramètres de la somme pondérée.

### *A2.1.3 L'affectation à base de règles*

L'affectation à base de règles (Azibi, 2003), comme méthode de construction d'un critère unique de synthèse, propose la combinaison des évaluations selon les différents critères $(g_1(a), g_2(a)\ldots, g_m(a))$ à partir de règles, afin d'affecter l'action $a$ à une catégorie $C_k$ ($C_k \in C$, où $C$ correspond à l'ensemble des catégories possibles).

Les règles utilisées sont de type « ***si***… ***alors…*** », où la partie « *condition* » concerne les modalités prises par l'action sur un sous-ensemble de critères, et où la partie « *conclusion* » indique l'affectation à une catégorie $C_k \in C$. La syntaxe générale des règles est de la forme :

*r :* ***si*** condition ($g_n a$) ; ***alors*** *a* est affectée à la catégorie $C_k$ ($C_k \in C$)

La partie condition d'une règle correspond à une conjonction de conditions élémentaires $c_i$:
Condition = $c_1 \ldots \wedge c_j \wedge \ldots \wedge c_n$.

Une base de règles doit répondre à trois exigences :

- *Complétude* : toute action doit être affectée à au moins une catégorie de l'échelle d'évaluation.
- *Exclusivité* : toute action doit être affectée à au plus une catégorie de l'échelle d'évaluation (ou à des catégories voisines si elles sont ordonnées)
- *Monotonie* (respect de la dominance) : toute action *a* qui domine une autre action *a'* ne peut être affectée à une catégorie inférieure à celle où est affectée *a'*.

***Exemple d'application (Azibi, 2003) :***
Dans le cadre de l'évaluation de différentes stratégies de réduction du risque d'inondation par la Loire, onze critères ont été définis tels que « *dommage sur l'habitat* », « *dommages sur les réseaux* », « *coût de mise en œuvre* », « *date d'achèvement de la mise en œuvre* » « *impact sur l'environnement naturel* » etc. Le critère « *impact sur l'environnement naturel* » est destiné à évaluer l'impact sur le milieu naturel des travaux inhérents à la mise en place de chaque stratégie. Le problème revient à évaluer, pour chaque stratégie, l'impact sur l'environnement naturel de la zone globale d'étude en agrégeant les impacts sur chacun des vals dans le cadre de chaque stratégie *a*. L'échelle d'évaluation des indicateurs a été définie par un expert écologue:

- *Impact fort* : destruction de l'habitat et/ou d'espèces animales rares ou protégées ;
- *Impact significatif* : destruction de l'habitat et/ou d'espèces animales fréquents mais présentant un caractère patrimonial ;
- *Impact faible* : destruction d'habitat et/ou d'espèces animales ordinaires.

La base de règles suivante a été élaborée en interaction avec les experts en écosystème :

- $R_1$ : règle d'affectation à la catégorie « *fort* » : « ***si*** au moins un val est noté '*fort*', ***alors*** l'impact global est noté 'fort' » ;
- $R_2$ : règle d'affectation à la catégorie « *significatif* » : « ***si*** au moins trois vals sont notés '*significatifs*' ***et*** aucun val n'est noté '*fort*', **alors** l'impact global est noté '*significatif*' » ;
- $R_3$ : règle d'affectation à la catégorie '*faible*' : « ***si*** le nombre de vals notés '*favorables*' est égal au nombre de vals notés '*significatifs*' à deux vals près, ***et*** aucun val n'est noté '*fort*', ***alors*** l'impact global est noté '*faible*' »

L'affectation à base de règles présente l'avantage de permettre une grande possibilité d'agrégation, au plus proche de la connaissance experte (Serre, 2005). On remarque que l'affectation à base de règles est conçue dans le but d'agréger des critères qualitatifs (Azibi, 2003) et évalués selon des échelles différentes (Labbouz, 2008).

***Synthèse***

Les méthodes du critère unique de synthèse consistent à attribuer pour chaque action une note globale unique pour les comparer. Nous remarquons que la perspective d'obtenir une note unique de synthèse pourrait être utile pour obtenir un indicateur représentant l'intérêt à réhabiliter un ouvrage.

De plus, certaines de ces méthodes permettent de modéliser des incertitudes et/ou des imprécisions sur l'information des critères. Nous notons également que, de manière générale, ces méthodes sont critiquées pour leur aspect compensatoire (Vincke, 1989), l'agrégation complète des données pouvant favoriser la compensation d'une mauvaise évaluation sur un critère par une bonne sur un autre critère.

### *A2.1.4 Arbre d'agrégation (Labbouz, 2008)*

Cette méthode d'agrégation a été développée dans le cadre d'un problème de décision consistant à choisir le tracé d'une nouvelle ligne de transport à partir du triplet « tracé – mode de transport – atelier-garage ».

Les critères utilisés sont le *« coût du projet de transport », les « impacts du projet sur la circulation générale », « la position de l'atelier-garage », « la desserte des pôles générateurs de trafic », la desserte des zones d'urbanisation future », « les impacts du projet sur l'environnement »* et *« les perturbations liées aux travaux de construction de la ligne de transport ».*

*« La position de l'atelier-garage »* est un critère à plusieurs conséquences. En effet, pour la construction de ce critère, on considère les paramètres suivants :

- La taille de la surface de la parcelle ;
- Le potentiel d'agrandissement de la parcelle ;
- Le nombre de kilomètres de voirie à construire pour l'accessibilité de la parcelle;
- La distance de l'atelier-garage à la ligne de transport.

La nature de ces paramètres est assez hétérogène comme on peut l'apprécier selon la description du tableau A2-4 :

| Paramètre | | Echelle d'évaluation | Nature des données |
|---|---|---|---|
| $S_u$ | Taille de la surface de la parcelle | Quantitative ($m^2$) | Données certaines* |
| $D$ | Nombre de kilomètres de voirie à construire pour l'accessibilité de la parcelle | Quantitative (km) | Données quasi-certaines* |
| $A$ | Potentiel d'agrandissement de la parcelle | Qualitative | Données quasi-certaines |
| $I$ | Distance de l'atelier-garage à la ligne de transport | Quantitative (km) | Données certaines |
| Critère agrégé | | Qualitative ordinale | |

** Les données sont considérées comme « certaine »s quand elles peuvent être contestées et « quasi-certaines » dans les autres cas.*

*Tableau A2-4 : Description des paramètres pour modéliser le critère « la position de l'atelier-garage » (Labbouz, 2008)*

La méthode de l'arbre d'agrégation permet de modéliser un critère à partir de différents paramètres hétérogènes, en considérant ceux-ci dans leurs unités d'origine. L'arbre d'agrégation se construit en plusieurs niveaux, qui représentent chacun une donnée à prendre en compte (dans notre cas, il s'agit des paramètres). Chaque niveau de l'arbre est décomposé en branches, auxquelles on associe une note. L'évaluation d'une action selon le critère considéré est la somme des notes présentes sur les différentes branches qui représentent les caractéristiques de l'action considérée. Afin d'illustrer cette méthodologie, nous synthétisons l'exemple développé dans (Labbouz, 2008).

Pour la construction du critère « *position de l'atelier-garage* », un arbre d'agrégation est bâti sur cinq niveaux (figure A2-9).

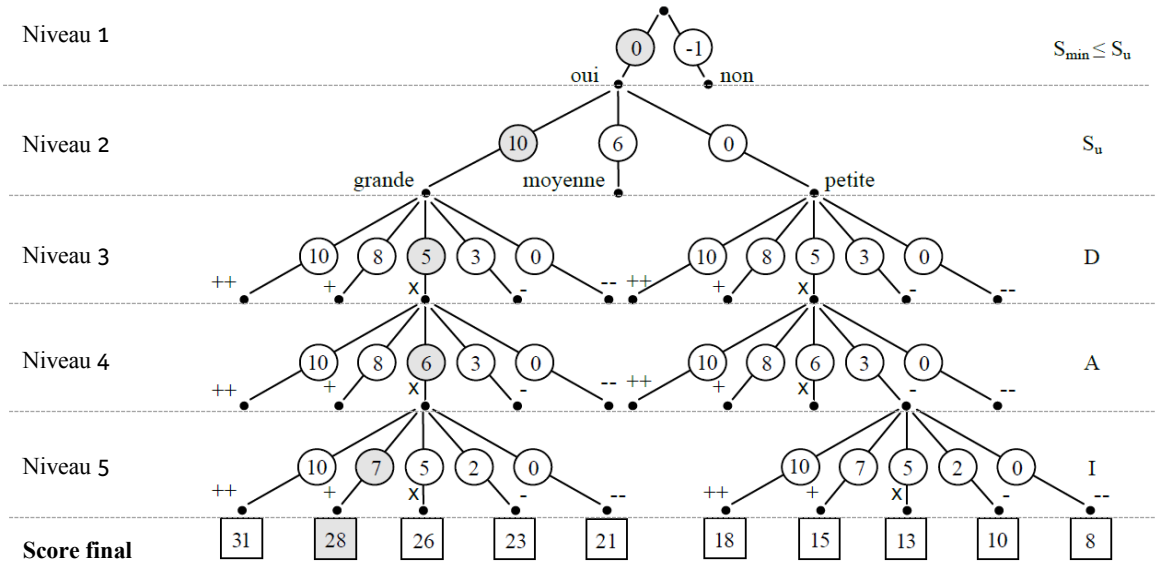



*Figure A2-9 : Arbre d'agrégation pour le critère « la position de l'atelier-garage » (Labbouz, 2008)*

***Niveau 1***

Le premier niveau de l'arbre d'évaluation correspond à une contrainte : il faut éliminer les triplets « tracé – mode de transport – atelier-garage » dont les sites qui y sont associés ont une surface utile $S_u$ inférieure à une surface minimale $S_{min}$ nécessaire. Si la surface utile du site est plus grande que la surface minimale requise, la branche de l'arbre porte la note 0. Dans le cas inverse, pour induire une élimination du tracé, la branche porte la note -1.

***Niveau 2***

Le niveau suivant de l'arbre caractérise la surface utile de la parcelle. Pour plus de simplicité, la surface utile $S_u$ est caractérisée en fonction de la surface minimale $S_{min}$ comme suite :

- $S_u$ est dite petite si $S_{min} < S_u < S_{min} + 1{,}05\ S_{min}$ ;
- $S_u$ est dite moyenne si $S_{min} + 1{,}05\ S_{min} < S_u < S_{min} + 1{,}1\ S_{min}$ ;
- $S_u$ est dite grande si $S_u > S_{min} + 1{,}1\ S_{min}$

Une note est alors attribuée à chaque branche représentant une catégorie de surfaces de parcelle :

- 0 si la surface est petite ;
- 6 si la surface est moyenne ;
- 10 si la surface est grande.

On peut considérer que cette évaluation correspond à une échelle qualitative à laquelle on associe des valeurs numériques (surface petite = 0) attribuées à base de règles du type « ***si… alors…*** » :

$r_{21}$ : ***si*** la surface utile $S_u$ est comprise entre $S_{min}$ et ($S_{min}$ + 1,05 $S_{min}$) ; ***alors*** la surface, considérée comme petite, est noté à 0 ;

$r_{22}$ : ***si*** la surface utile $S_u$ est comprise entre ($S_{min}$ + 1,05 $S_{min}$) et ($S_{min}$ + 1,1 $S_{min}$) ; ***alors*** la surface, considérée comme moyenne, est noté à 6 ;

$r_{23}$ : ***si*** la surface utile $S_u$ est supérieur à ($S_{min}$ + 1,1 $S_{min}$) ; ***alors*** la surface, considérée comme grande, est noté à 10 ;

***Niveau 3***

Le troisième niveau de l'arbre d'évaluation permet de prendre en compte les données en termes d'éloignement de la ligne au site choisi. La distance $D$ au site est classée en cinq catégories :

- la catégorie (– –) si $D > 1000$ m ;
- la catégorie (–) si 700 m < $D \leq 1000$ m ;
- la catégorie (X) si 500 m < $D \leq 700$ m ;
- la catégorie (+) si 200 m < $D \leq 500$ m ;
- la catégorie (+ +) si 0 m < $D \leq 200$ m ;

Les dénominations sont ainsi faites puisque plus la ligne est proche du site, meilleure est la variante évaluée. Une note est alors attribuée à chaque branche :

- 0 pour la catégorie (– –) ;
- 3 pour la catégorie (–) ;
- 5 pour la catégorie (X) ;
- 8 pour la catégorie (+) ;
- 10 pour la catégorie (+ +).

Dans ce niveau 3, on associe à l'échelle qualitative d'attribution un codage numérique (catégorie ++ = 10). Ces notes sont elles aussi déterminées à partir de règles d'affectation du type « ***si… alors…*** » :

$r_{31}$ : ***si*** *D* est supérieur à 1000 m ; ***alors*** catégorie (– –), note 0 ;

$r_{32}$ : ***si*** *D* est comprise entre 700 m et 1000 m ; ***alors*** catégorie (–), note 3 ;

$r_{33}$ : ***si*** *D* est comprise entre 500 m et 700 m ; ***alors*** catégorie (X), note 5 ;

$r_{34}$ : ***si*** *D* est comprise entre 200 m et 500 m ; ***alors*** catégorie (+), note 8 ;

$r_{35}$ : ***si*** *D* est inférieur à 200 m ; ***alors*** catégorie (++), note 10.

***Niveau 4***

La prise en compte des potentialités d'agrandissement *A* du dépôt se fait par les techniciens qui mènent les études de transport. Les potentialités sont fonction de l'occupation du sol et du sous-sol environnant la parcelle. Les propriétaires, les activités, la présence de réseaux majeurs enterrés, la forme initiale de la parcelle… sont autant d'éléments pris en compte pour évaluer la complexité d'une opération d'agrandissement du site.

En fonction de cela et de leurs connaissances du contexte local, les techniciens peuvent classer les différentes parcelles en cinq catégories allant de la catégorie (– –) : « il sera impossible d'agrandir le dépôt », à la catégorie (+ +) : « le dépôt pourra être agrandi sans difficulté majeure».

Ces catégories forment le quatrième étage de l'arbre d'évaluation. Les notes associées à chaque branche sont :

- 0 pour la catégorie (– –) ;
- 3 pour la catégorie (–) ;
- 6 pour la catégorie (X) ;
- 8 pour la catégorie (+) ;
- 10 pour la catégorie (+ +).

Dans ce cas, l'affectation des catégories dépend directement du critère des techniciens. Ce manque de précision dans la définition du potentiel d'agrandissement, induit par la définition même de ce potentiel, dépendant essentiellement du contexte urbain local, est à souligner, puisqu'il peut engendrer des débats entre techniciens lors de la notation.

Une échelle qualitative à valeurs numériques est également retenue (catégorie (– –) = 0).

***Niveau 5***

Le dernier étage de l'arbre représente l'accessibilité du site aux poids lourds. Celle-ci est mesurée en longueur de voirie à modifier ou à créer pour que l'accès soit possible. Cette longueur *l* est classée en cinq catégories :

- la catégorie (– –) si 500 m < *l*
- la catégorie (–) si 300 m < *l* ≤ 500 m ;
- la catégorie (X) si 100 m < *l* ≤ 300 m ;
- la catégorie (+) si 50 m < *l* ≤ 100 m ;
- la catégorie (+ +) si 0 m < *l* ≤ 50 m.

Une note est alors attribuée à chaque branche :

- 0 pour la catégorie (– –) ;
- 2 pour la catégorie (–) ;
- 5 pour la catégorie (X) ;
- 7 pour la catégorie (+) ;
- 10 pour la catégorie (+ +).

Comme dans les cas précédents, cette évaluation correspond à une échelle qualitative à laquelle est associée des valeurs numériques (catégorie (– –) = 0), déterminées sur la base de règles du type « ***si… alors…*** » :

$r_{51}$ : ***si*** *l* est supérieur à 500 m ; ***alors*** catégorie (– –), note 0 ;

$r_{52}$ : ***si*** *l* est comprise entre 300 m et 500m ; ***alors*** catégorie (–), note 2 ;

$r_{53}$ : ***si*** *l* est comprise entre 100 m et 300 m ; ***alors*** catégorie (X), note 5 ;

$r_{54}$ : ***si*** *l* est comprise entre 50 m et 100 m ; ***alors*** catégorie (+), note 7 ;

$r_{55}$ : ***si*** *l* est inférieure à 50 m ; ***alors*** catégorie (++), note 10.

***Score final***

Enfin, pour avoir l'évaluation finale des actions pour le critère "la position de l'atelier-garage", il suffit d'additionner les notes des cinq étages de l'arbre pour obtenir le score final.

***Synthèse***

Cette méthode d'agrégation permet de construire un critère à partir de paramètres hétérogènes. Chaque niveau de l'arbre correspond à **l'évaluation d'un paramètre réalisée à partir de règles d'affectation du type « *si… alors…* »**. Ces règles d'affectation permettent d'évaluer tous les paramètres dans une même échelle qualitative à laquelle on associe des valeurs numériques de 0 à 10, respectant le même sens de préférence : la note 0 représente la situation la plus défavorable, et 10 la plus favorable.

Ensuite, **les différentes évaluations sont agrégées dans une seule note grâce à un mécanisme d'agrégation analytique : l'addition**.

Cette méthode d'agrégation nous semble adaptée pour construire notre critère de « *performance* », les items suivants étant communs avec notre problématique :

- Construction d'un critère à partir de paramètres hétérogènes. Le mécanisme d'affectation par règles permet d'homogénéiser les différents paramètres et de les évaluer dans une seule échelle de référence, ce qui facilitera ensuite l'agrégation ;
- La distribution par niveau permet d'établir un ordre d'agrégation. De cette façon, l'agrégation de paramètres pour obtenir un critère de performance peut se réaliser en cohérence avec les séquences de défaillances identifiées dans les mécanismes de déclenchement des travaux de maintenance ;
- L'addition des évaluations des paramètres, comme mécanisme d'agrégation analytique, est simple et facile à interpréter.

## A2.2 Les méthodes du surclassement de synthèse (Roy, 1985; Roy et Bouyssou, 1993)

Les méthodes du surclassement de synthèse visent à construire un système de préférence relationnel pour la comparaison ***des actions deux à deux pour chaque critère***. Le principe général est le suivant : le surclassement d'une alternative par rapport à une autre est établi si deux conditions sont satisfaites :

- Une ***condition de concordance***, où une majorité suffisamment forte de critères soutient la proposition de surclassement ;
- Une ***condition de non discordance (ou de non véto)***, où la minorité restante de critères ne s'oppose pas fortement à la validation de la proposition.

Les méthodes du surclassement de synthèse nécessitent la définition **d'*une relation de surclassement (S)***: c'est une relation binaire *S* définie sur l'ensemble *A* telle que *a S b* si, étant donné la qualité des évaluations des actions et la nature du problème, il y a suffisamment d'arguments pour admettre que *a* est au moins aussi bonne que *b*, sans qu'il y ait de raison importante de refuser cette affirmation (Vincke, 1989).

Ces méthodes peuvent être scindées en deux étapes :

- La construction des relations de surclassement, dans lesquelles on fait intervenir la notion de poids des critères en vue de représenter leur importance relative ;
- Son exploitation en vue de la problématique choisie.

De nombreuses méthodes d'agrégation multicritère de type surclassement ont été développées, dont les plus connues sont la famille des méthodes ELECTRE (Roy et Bouyssou, 1993), PROMETHEE (Brans, 1985). Nous présentons ci-dessous la famille de méthode ELECTRE.

### A2.2.1 ELECTRE I

Apparue en 1968, il s'agit de la plus ancienne et de la plus simple des méthodes de la famille ELECTRE, pionnière des méthodes de surclassement. ELECTRE I s'applique au cas où *F* ne comporte que des vrais critères. Elle fait intervenir pour chacun d'eux :

- Un coefficient d'importance $k_j > 0$ ;
- *U*n seuil de véto $v_j(g_j) > 0$

Ce sont des données inter-critères que l'on retrouve dans la plupart des procédures d'agrégation multicritère semblables. La façon de leur attribuer une valeur numérique se reprécise lors de l'analyse de robustesse.

Compte tenu des hypothèses qui viennent d'être précisées, on peut poser :

$$C(b\ S\ a) = \{j \in F :\ g_j(b) \geq g_j(a)\}\ \forall\ C\ \subset F, k[C] = \sum_{j \epsilon C} k_j$$

c'est-à-dire que la proposition *b* surclasse *a*, notée « *C (b S a)* », est fonction de la somme des importances *k* des critères en faveur de cette proposition.

Dans ELECTRE I, la proposition *b S a* est regardée comme valide si et seulement si les deux conditions suivantes sont satisfaites :

- *Condition de concordance :* on mesure l'importance de la coalition de critères *C (a S b)* et on la compare au seuil *s* dit niveau de concordance.

$$\frac{k[C(bSa)]}{k[F]} \geq s, avec\ {}^{1}/_{2} \leq s \leq 1 - \frac{\min_{j \in F} k_j}{k[F]}$$

- *Condition de non véto* : on vérifie qu'il n'y ait pas un critère pour lequel *a S b* de tel manière que cela infirme l'information de la coalition *C (b S a)* quelle qu'elle soit.

  $\forall j \in F,\ g_j(b) + v_j[g_j(b)] \geq g_j(a)$

La méthode ELECTRE I répond à une problématique de choix à partir de la comparaison des actions deux à deux sur chaque critère. Ses résultats sont exploitables de la manière suivante : on recherche un sous ensemble *N* d'actions tel que toute action qui n'est pas dans *N* est surclassée par au moins une action de *N*, jusqu'à ce que les actions de *N* soient incomparables entre elles.

Ce type d'approche donne des résultats moins riches que dans une procédure d'agrégation de type critère unique de synthèse (Vincke, 1989). Il arrive parfois que les résultats soient difficilement interprétables et que l'on n'arrive pas à départager certains sous-ensembles d'actions. On peut alors, au sein des groupes d'actions incomparables, affiner l'analyse des résultats au moyen d'algorithmes, ou de variations successives des paramètres de concordance, de discordance et de pondération.

### *A2.2.2 Les méthodes ELECTRE II et III*

La *méthode ELECTRE II* a été construite pour répondre à une problématique de rangement et utilise de vrais critères. Elle consiste à classer les propositions de la meilleure à la moins bonne, en tolérant les ex-æquo. A la différence d'ELECTRE I, les tests de concordance et de non discordance sont imbriqués dans ELECTRE II. En outre, on fait la distinction entre surclassement faible et surclassement fort.

*ELECTRE III* répond aussi à une problématique de rangement, cette fois-ci avec des pseudo-critères. Cette méthode permet d'intégrer le flou dans la relation de surclassement, et donc de tenir compte des incertitudes dans les données du problème de décision (Maystre *et al.*, 1994).

La réflexion ne porte pas sur l'acceptation ou le rejet en bloc de l'hypothèse de surclassement, mais sur la crédibilité à accorder à cette hypothèse. Ceci est traduit par l'indice de crédibilité de l'hypothèse de surclassement $\sigma_S(b, a)$. Cet indice prend appui :

- D'une part sur l'indice de concordance *c(b,a)* qui tient compte de l'importance des critères qui supportent l'assertion (*b S a*) (l'action *b* est au moins aussi bonne que l'action *a*) ;
- D'autre part sur l'indice de discordance *d(b, a)*, qui considère l'importance des critères qui ne supportent pas l'assertion (*b S a*).

L'indice de crédibilité est défini selon la formule :

$$\sigma_S(b,a) = c(b,a) \times \prod_{j \in D_c(b,a)} \frac{1-d_j(b,a)}{1-c(b,a)}$$

Avec $D_c(b,a) = \{j \in F : d_j(b,a) > c(b,a)\}$

L'indice de crédibilité $\sigma_S(b, a)$ varie de 0 à 1, où 1 représente la crédibilité maximale de l'assertion (*b S a*) et 0 une crédibilité nulle.

### A2.2.3 La méthode ELECTRE TRI

La méthode ELECTRE TRI, répond à une procédure de tri basée sur des surclassements flous (pseudo critères, acceptant les seuils d'indifférence et de préférence). Elle suit la démarche développée pour ELECTRE III comprenant l'indice de crédibilité $\sigma_S(b, a)$ qu'elle compare avec un seuil de coupe $\lambda$ définissant une valeur minimale pour valider l'assertion ($b\ S\ a$) tel que : $\sigma_S(b, a) \geq \lambda$, $o \leq \lambda \leq 1$.

Les actions de l'ensemble $A$ ne sont pas, comme dans les autres méthodes ELECTRE, comparées deux à deux, mais à des actions fictives $b_h$ (h = 1, …, k – 1) jouant le rôle de profils de référence. Ces actions fictives sont représentatives d'un état limite autour duquel existent les catégories ($C_1$, …, $C_k$) constituant une famille complètement ordonnée de catégories auxquelles on veut affecter les actions de l'ensemble $A$.

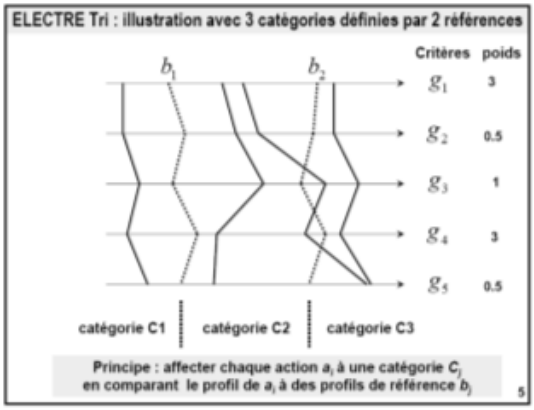



*Figure A2-10 : ELECTRE TRI, catégories et vecteurs de performance (Le Gauffre et al., 2008)*

La figure A2-10 illustre une utilisation d'ELECTRE TRI dans l'outil d'aide à la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement INDIGAU (Le Gauffre et *al.*, 2008). Cet outil permet de classer les tronçons nécessitant une réhabilitation en trois niveaux de préoccupation croissants représentés par les catégories $C_1$, $C_2$ et $C_3$. Ces catégories sont délimités par les actions de référence $b_1$ et $b_2$ et leurs profils en pointillé sur les critères $g_1$, …, $g_5$. Chaque action, ici représentée en traits continus, est classée dans les catégories $C_1$, $C_2$ ou $C_3$ en fonction du surclassement défini entre elles et des profils de référence $b_1$ et $b_2$.

Dans la méthode ELECTRE TRI, l'affectation des actions dans une catégorie est faite selon deux procédures :

- L'une, *optimiste*, teste par ordre ascendant ($b_1$, $b_2$, …, $b_f$) le seuil de référence le plus bas qui surclasse l'action $a$, de telle façon que $b_f\ S\ a$. On affecte alors $a$ dans la catégorie $C_f$, bornée supérieurement par le profil $b_f$ (fig. A2-11) :

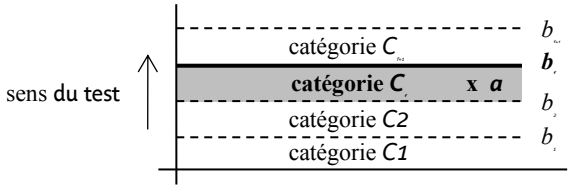



*Figure A2-11 : Procédure optimiste ($b_f S\ a$)*

- L'autre procédure est dite *pessimiste* : on teste, par ordre descendant ($b_k$, $b_{k-1}$, …, $b_{h-1}$), quel est le profil de référence le plus haut surclassé par l'action *a*. Ce seuil de référence est nommé $b_{h-1}$, de telle façon que $a\ S\ b_{h-1}$. Alors, l'action *a* est affectée à la catégorie $C_h$, bornée inférieurement par le seuil $b_{h-1}$ (fig. A2-12) :

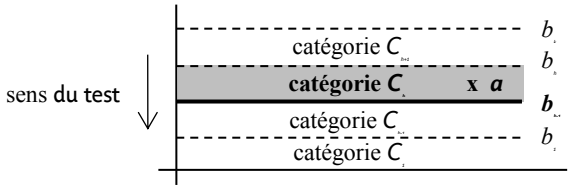



*Figure A2-12 : Procédure pessimiste (a S $b_{h-1}$)*

Pour certaines actions, les deux affectations peuvent coïncider ($f = h$), mais il se peut aussi qu'une action *a* soit affectée en catégories différentes ($f \neq h$). Dans le cas où l'affectation pessimiste et l'optimiste conduisent à des affectations différentes, l'ajustement du seuil de coupe $\lambda$ permettra de durcir ou d'assouplir les conditions de surclassement. Ainsi, réduire $\lambda$ conduit à réduire l'écart entre les affectations pessimiste et optimiste. Mais nous rappelons que réduire le seuil de coupe $\lambda$ impliquerait l'acceptation de valeurs de l'indice de crédibilité $\sigma_S(b, a)$ plus proches de 0, ce qui correspond aux situations d'incomparabilité entre l'action *a* et les seuils de référence $b_i$ (Roy et Bouyssou, 1993).

***Application d'ELECTRE TRI pour la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement (Le Gauffre et al., 2008)***

*Présentation du problème d'aide à la décision INDIGAU :*

Le guide RERAU (Réhabilitation des réseaux d'assainissement urbain) (Le Gauffre et *al.*, 2004b) propose la construction de critères de décision pour les actions d'investigation et de réhabilitation des réseaux non visitables d'assainissement. Les critères de décision pour l'identification et la hiérarchisation des tronçons prioritaires vis-à-vis de réhabilitations sont construits à partir de l'impact des défauts détectés ou susceptibles de l'être, sur le fonctionnement, ou le coût de fonctionnement du réseau.

*Construction des critères de réhabilitation des réseaux d'assainissement basés sur un jeu d'indicateurs de performances :*

Les niveaux de dysfonctionnements, triés selon trois seuils en classe G1, G2, G3 ou G4, sont observés et/ou estimés qualitativement à partir des défauts estimés et/ou observés sur les conduites.

- Exemples de défauts : fissure, déformation, année de construction, matériaux ;
- Exemples de dysfonctionnements : DEB (débordement) ; INF (infiltration), BOU (bouchage) ;
- Exemples d'impacts : POL (pollution des eaux de surface) ; DOB (dommages au bâti) ; CXS (surcoût d'exploitation de la station d'épuration).
- Exemples de critères de décision :
  - POL/ DEV-TS/ INF : pollution par déversements de temps sec liés aux eaux d'infiltrations ;
  - NUH/ DEB/ BOU : nuisance de débordement observé dû à des bouchages.

Les critères construits, il reste à déterminer une méthode multicritère d'aide à la décision pour trier les tronçons par ordre de priorité d'investigation ou de réhabilitation. Les critères évaluent les tronçons selon quatre niveaux par ordre de gravité croissante : G1, G2, G3 et G4.

*Application d'ELECTRE TRI*
La méthode ELECTRE TRI a été retenue pour identifier les tronçons nécessitant une réhabilitation et les classer en trois niveaux de préoccupation croissants : *A, B, C*.

Pour appliquer la méthode ELECTRE TRI , les notes $G_1$, $G_2$, $G_3$ et $G_4$, des tronçons ont été associées à des valeurs numériques. Des profils de référence $b_1$ et $b_2$ ont également été définis pour répartir les tronçons selon trois catégories $C_1$, $C_2$ et $C_3$, ainsi qu'un seuil de préférence forte et un seuil de coupe. La comparaison des tronçons avec chaque profil $b_i$ pour l'ensemble des critères permet de les trier par catégories, relativement à la priorisation de leur réhabilitation.

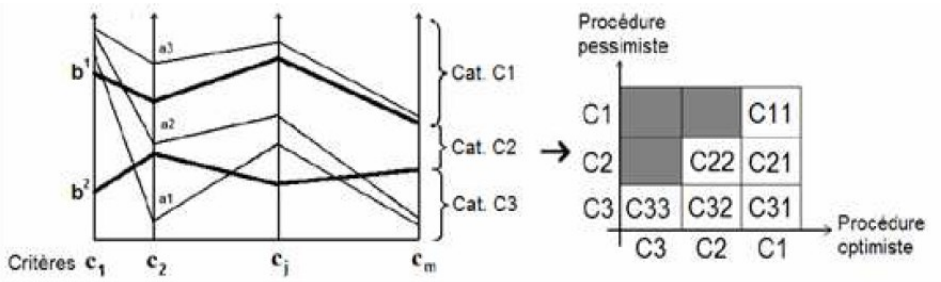


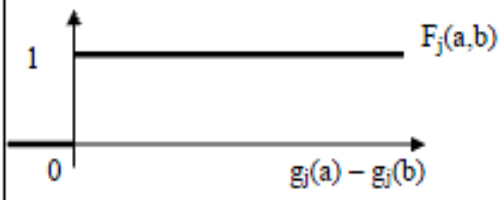
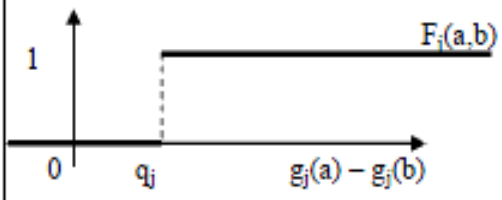
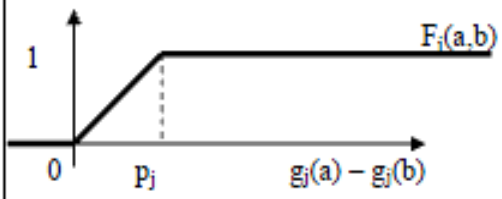
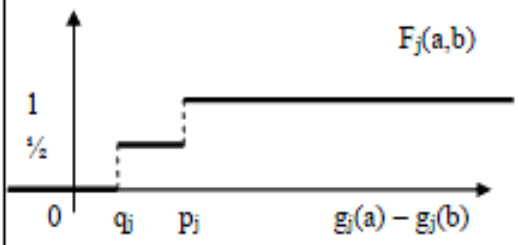

*Figure A2-13 : Application ELECTRE TRI, procédure d'affectation des tronçons dans des catégories (Le Gauffre et al., 2008)*

Les méthodes de l'aide à la décision multicritère sont mises en œuvre pour la construction de l'outil de gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement INDIGAU. Les critères de réhabilitation des réseaux résultent de l'agrégation des indicateurs de l'état des ouvrages, des dysfonctionnements et de leurs impacts sur la gestion du réseau. La méthode ELECTRE TRI permet ensuite de trier les ouvrages par niveaux de performance et, ainsi, d'identifier les tronçons prioritaires pour des opérations de réhabilitation. Cette démarche pourrait être pertinente pour notre problématique de gestion au long terme (§ 8.1).

***Synthèse***
Le principal avantage des méthodes de surclassement est de comparer les actions sur chaque critère sans convertir ces derniers dans une échelle commune. On peut ainsi répondre à un problème de décision considérant des critères qualitatifs et quantitatifs (Roy et Bouyssou, 1993), sous format probabiliste (Martel, 1995) ou flou (Bollinger *et al.*, 1997). Toutefois, on remarque que la formulation complexe de ces méthodes peut produire un effet « *boîte noire* » susceptible d'ajouter de la complexité au problème d'aide à la décision, qui plus est pour un utilisateur non spécialiste de l'aide à la décision.

### *A2.2.4 Les méthodes PROMETHEE (Brans et Vincke, 1985), (Hammami, 2003)*

***Fondements de la méthode***
Les méthodes PROMETHEE se basent sur une extension de la notion de critère par l'introduction d'une fonction exprimant la préférence du décideur pour une action ai par rapport à une autre action $a_k$. Pour chaque critère, le décideur est appelé à choisir une des six formes de courbes représentées ci-dessous. Les paramètres relatifs à chaque courbe représentent des seuils d'indifférence et/ou de préférence (fig. A2-14).

| | |
|---|---|
| *1ère forme : Vrai-critère*<br>  <br> | • Préférence stricte immédiate.<br>• Pas de paramètres à déterminer.<br>$F_j(a,b)=\begin{cases}1 & si \quad g_j(a)>g_j(b)\\ 0 & si \quad g_j(a)\leq g_j(b)\end{cases}$ |
| *2ème forme : Quasi-critère*<br>  <br> | • Il existe un seuil d'indifférence (quasi-critère) qui doit être fixé.<br>$F_j(a,b)=\begin{cases}1 & si \quad g_j(a)-g_j(b)>q_j\\ 0 & si \quad g_j(a)-g_j(b)\leq q_j\end{cases}$ |
| *3ème forme : Pré-critère*<br>  <br> | • La préférence croit jusqu'à un seuil de préférence qui doit être fixé.<br>$F_j(a,b)=\begin{cases}1 & si \quad g_j(a)-g_j(b)>p_j\\ \dfrac{g_j(a)-g_j(b)}{p_j} & si \quad 0<g_j(a)-g_j(b)\leq p_j\\ 0 & si \quad g_j(a)-g_j(b)\leq 0\end{cases}$ |
| *4ème forme : Pseudo-critère 1*<br>  <br> | • Il existe un seuil d'indifférence et un seuil de préférence à fixer (pseudo-critère); entre les deux, la préférence est moyenne.<br>$F_j(a,b)=\begin{cases}1 & si \quad g_j(a)-g_j(b)>p_j\\ ½ & si \quad q_j<g_j(a)-g_j(b)\leq p_j\\ 0 & si \quad g_j(a)-g_j(b)\leq q_j\end{cases}$ |

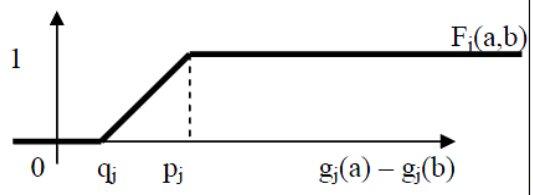
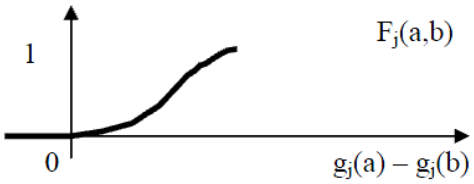
| | |
|---|---|
| ***5ème forme : Pseudo-critère 2***   | • Il existe un seuil d'indifférence et un seuil de préférence à fixer; entre les deux la préférence est croissante. $F_j(a,b)=\begin{cases} 1 & si\ \ g_j(a)-g_j(b)>p_j \\ \dfrac{g_j(a)-g_j(b)-q_j}{p_j-q_j} & si\ \ q_j<g_j(a)-g_j(b)\leq p_j \\ 0 & si\ \ g_j(a)-g_j(b)\leq q_j \end{cases}$ |
| ***6ème forme : Critère gaussien***   | • La préférence croit suivant une loi gaussienne dont il faut fixer l'écart type. $F_j(a,b)=1-\exp(-\dfrac{g_j(a)-g_j(b)}{-2\sigma^2})$ (avec σ = écart-type) |

*Figure A2-14 : Différents types de critères (Vincke, 1989)*

Les Méthodes PROMETHEE I et II se présentent comme suit :

- ***Etape 1*** : on fixe pour chaque critère, une des six formes de courbes proposées dans PROMETHEE ainsi que les paramètres qui lui sont associés.
- ***Etape 2*** : pour chaque couple d'actions ($a_i$, $a_k$); on calcule la préférence globale (degré de surclassement) de la manière suivante :
  $P(a_i, a_k) = \sum_{j=1}^{n} \pi_j F_j(a_i, a_k)$
- ***Étape 3*** : calculer les flux entrant et sortant pour chaque action $a_i$ :
  $\Phi^+(a_i) = \sum_{a_k \in A;\ a_k \neq a_i} P(a_i, a_k)$ flux positif qui exprime la force de $a_i$ : flux sortant

  $\Phi_-(a_i) = \sum_{a_k \in A;\ a_k \neq a_i} P(a_k, a_i)$ flux négatif qui exprime la faiblesse de $a_i$ :flux entrant

- ***Étape 4*** : déterminer les 2 pré-ordres totaux et procéder au rangement des actions :
  - Le premier pré-ordre total consiste à ranger les actions dans l'ordre décroissant des $\Phi^+$
  - Le second pré-ordre total consiste à ranger les actions dans l'ordre croissant des $\Phi_-$
  - L'intersection des 2 pré-ordres totaux fournit le pré-ordre partiel de la méthode PROMETHEE I
  - PROMETHEE II consiste à ranger les actions selon l'ordre décroissant des scores $\Phi(a_i)$ définis comme suit :
    $\Phi(a_i) = \Phi^+(a_i) - \Phi_-(a_i)$
    Ainsi, PROMETHEE II fournit un pré-ordre total.

## A2.3 Les méthodes itératives

Les approches du critère unique de synthèse et du surclassement de synthèse présentées ci-dessus sont bien adaptées à un ensemble d'actions *A* de taille raisonnable. Or, lorsque les actions varient en continu, il arrive que l'ensemble *A* soit très grand ou infini. Les méthodes interactives proposent une exploration localisée et répétitive de *A* (Ben Mena, 2000). Cette exploration est menée par une alternance de calculs et de dialogues entre l'homme d'étude et le décideur.

Dans les méthodes itératives, l'homme d'étude modélise le problème d'aide à la décision en interaction avec le décideur (dialogue 1). Les résultats (calcul 1) doivent permettre au décideur de donner des informations supplémentaires sur ces préférences et/ou sur l'ensemble *A* (dialogue 2). L'information produite permet à l'homme d'étude de proposer une nouvelle modélisation du problème d'aide à la décision (calculs 2) et ainsi de suite (fig. A2-15).

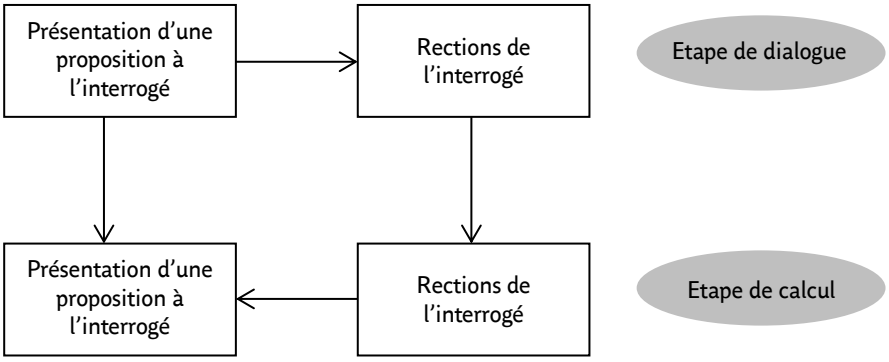



*Figure A2-15 : Schéma général de fonctionnement d'une méthode itérative (Roy et Bouyssou, 1993)*

***Les méthodes STEM et PREFALC***

La méthode STEM a été conçue pour aider l'utilisateur à se déplacer dans l'espace des actions. Elle présente à l'interrogé, lors de chaque itération, une proposition obtenue en minimisant une distance au point idéal de *A* (le point idéal de *A* est défini comme le vecteur de performance de l'action cible hypothétique *a* idéale à atteindre). Chaque itération est constituée d'une agrégation réalisée par une fonction d'agrégation temporaire, destinée à être modifiée entre les itérations.

Au cas où cette proposition est jugée insatisfaisante par le décideur au cours de la phase de dialogue, celui-ci est invité à réagir en indiquant un critère sur lequel il serait prêt à faire une concession et en indiquant la quantité maximale qu'il serait prêt à concéder sur ce critère. Cette indication est utilisée dans l'étape de calcul ultérieure pour redéfinir la zone d'intérêt et modifier la pondération utilisée dans la fonction d'agrégation temporaire.

La méthode PREFCALC permet de répondre à la problématique de tri en combinant des modèles additifs. Pour plus de détails sur ces méthodes, nous renvoyons le lecteur intéressé vers (Roy et Bouyssou, 1993) et (Benayoun et al., 1971).

## A2.4 Synthèse sur les méthodes d'aide à la décision multicritère

Les méthodes d'aide à la décision multicritère est un domaine très vaste et dépasse le cadre de notre recherche. Nous avons présenté ici les méthodes qui sont susceptibles d'être adaptées à notre problématique et renvoyons le lecteur intéressé vers (Hammami, 2003) et (Roy et Bouyssou, 1993).

Les méthodes pour la construction d'un critère unique de synthèse et les méthodes de surclassement présentent des démarches intéressantes pour le travail d'aide à la décision lié à la gestion du patrimoine. Nous avons remarqué que les méthodes du critère unique de synthèse permettent de modéliser un problème d'aide à la décision multicritère sous la forme d'une fonction analytique, tandis que les méthodes de surclassement procèdent par comparaison des actions deux à deux sur chaque critère et analyse des coalisations de critères établissant une préférence.

Les méthodes du critère unique de synthèse peuvent modéliser des incertitudes ou des imprécisions dans le problème d'aide à la décision, sous format flou ou probabiliste. Les méthodes de surclassement permettent également de prendre en charge les incertitudes et imprécisions par l'introduction de seuils de préférence et par l'utilisation de pseudo-critères.

Dans un problème d'aide à la décision, il n'existe a priori pas de bonnes ou de mauvaises méthodes, mais plutôt une méthode mieux adaptée au problème multicritère : ces deux catégories de méthodes devront être mises en œuvre pour déterminer la mieux adaptée à notre recherche.

## A2.5 Choix des méthodes multicritère d'aide à la décision

D'après l'étude des méthodes multicritère d'aide à la décision présentée aux paragraphes précédents, nous constatons que ces méthodes se différencient par la façon de modéliser les préférences du décideur, par la décision de pondérer ou non les critères, ainsi que par la problématique à traiter : problématique du *choix* (P.α), problématique de l'*affectation* ou *tri* (P.β), ou problématique du *rangement* (P.γ).

Il est possible d'établir un classement des différentes méthodes, en fonction des informations constituant les données d'entrée (input) et des résultats (output), ce qui aidera à la conception d'une procédure de choix. En effet, cette idée est à la base de la classification des méthodes multicritère proposée par (Guitouni et *al.*, 1999). Cette classification est définie sur 24 inputs et 7 outputs, ce qui correspond à une matrice de taille (23 x 7). Les différentes méthodes multicritère sont placées dans les cases correspondantes de la matrice. Les résultats de cette classification sont présentés dans le (tableau A2-5).

| Inputs | Outputs | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | O1 | O2 | O3 | O4 | O5 | O6 | O7 |
| I1 | | | Borda<br>Condorcet | | Conjonctive<br>Disjonctive | | |
| I2 | | | | | | | |
| I3 | | | | ELECTRE IV | | | |
| I4 | | | | | MaxMin | | |
| I5 | | | | | | | |
| I6 | | | | | | | |
| I7 | | | | | | | |
| I8 | | | | | | | |
| I9 | | | | | | | |
| I10 | | Lexicographique | | ORESTE | | | |
| I11 | | | | | | | |
| I12 | | | | MELCHIOR | | | |
| I13 | | | | | | | |
| I14 | | | | | | | |
| I15 | | | | | | | |
| I16 | | | NAIDE II | NAIADE I | | | |
| I17 | | | REGIME<br>QUALIFEX | ELECTRE II | | ELECTRE<br>I | |
| I18 | | | PROMETHEE<br>II | PROMETHEE<br>I | | | ELECTRE<br>TRI |
| I19 | | | | ELECTRE III | | ELECTRE<br>IS | |
| I20 | Somme<br>pondérée<br>MAUT<br>TOPSIS | | MAVT<br>SMART<br>UTA | | | | |
| I21 | Somme<br>pondérée<br>AHP<br>Somme<br>pondérée<br>floue | | | | MaxMin flou | | |
| I22 | | | | | | | |
| I23 | | | | | | | |
| I24 | | | PAMSSEM II | PAMSSEM I | | | |

*Tableau A2-5 : Classification des méthodes multicritère d'aide à la décision selon la matrice inputs/outputs (Guitouni et al., 1999)*

Nous tenons à préciser que les méthodes interactives ne sont pas concernées par cette classification. Par ailleurs, certaines méthodes non explicitées dans les paragraphes précédents, comme MECHIOR, NAIADE, ORESTE…, ont été placées sur la matrice inputs/outputs. Nous trouvons plus de détails sur ces méthodes dans (Vincke, 1989) et (Guitouni, 2000).

La description des différents inputs et outputs de la matrice ci-dessus dépasse le cadre de cette section. Nous nous limitons à expliciter les inputs et outputs correspondant à des cases pleines de la matrice (tableaux A2-6 et A2-7) :

| Inputs | Signification |
|---|---|
| **I1** | *n* structures {P, I} de préordres |
| **I3** | *n* structures {P, I} de semiordres et/ou structures {P, I, Q} de pseudo-ordres plus des seuils de véto *v* |
| **I4** | *n* fonctions d'utilité (*u*) (d'utilité (valeur) partielle) exprimées sur des échelles intervalles |
| **I10** | *n* structures {P, I} de semiordres et/ou structures {P, I, Q} de pseudo-ordres et une relation de préordre complet ($\succ$) sur les attributs (critères). |
| **I12** | *n* fonctions d'utilité (*u*) (d'utilité (valeur) partielle) exprimées sur des échelles intervalles et une relation de préordre complet ($\succ$) sur les attributs. |
| **I16** | *n* structures {P, I} de semiordres et/ou {P, I, Q} de pseudo-ordres plus des seuils de véto *v* définies sur des évaluations distributionnelles plus une relation de préordre complet ($\succ$) sur les attributs. |
| **I17** | *n* structures {P, I} de préordres plus un vecteur de coefficients d'importance relative (π) des critères |
| **I18** | *n* structures {P, I} de semiordres et/ou structures {P, I, Q} de pseudo-ordres plus un vecteur de coefficient d'importance relative (π) des critères |
| **I19** | *n* structures {P, I} de semiordres et/ou structures {P, I, Q} de pseudo-ordres plus des seuils de véto *v* plus un vecteur de coefficient d'importance relative (π) des critères. |
| **I20** | *n* fonctions d'utilité (*u*) (d'utilité (valeur) partielle) exprimées sur des échelles intervalles plus un vecteur de coefficient d'importance relative (π) des critères |
| **I21** | *n* fonctions d'utilité (*u*) (d'utilité (valeur) partielle) exprimées sur des échelles ratops plus un vecteur de coefficient d'importance relative (π) des critères |
| **I24** | *n* structures {P, I} de semiordres et/ou structures {P, I, Q} de pseudo-ordres plus des seuils de véto *v* définies sur des évaluations distributionnelles plus un vecteur de coefficient d'importance relative (π) des critères. |

- {P : relation de préférence stricte, Q : relation de préférence faible, I : relation d'indifférence
- {P, I, Q} $\equiv \{\succ, \sim, \succ^{f}\}$

*Tableau A2-6 : Tableau de caractérisation des inputs (Guitouni et al., 1999)*

| Outputs | Signification |
|---|---|
| **O1** | *Evaluation globale* (un score global par exemple) : cette situation traduit la volonté de construire un critère unique de synthèse. Le score global est de niveau cardinal |
| **O2** | *Un rangement global des actions en considérant un seuil d'indifférence* ($\{\succ, \sim\}$ : une structure de semiordre total) : l'introduction de seuils permet d'introduire des nuances ou limiter certaines conclusions (de surclassement) par exemple. |
| **O3** | *Un rangement total des actions avec possibilité d'ex aequo* ($\{\succ, \sim\}$ : une structure de préordre total) : l'objectif dans ce cas est souvent le rangement des actions de la meilleure à la moins bonne. Dans ce cas, toutes les actions sont comparables ; il est possible de les discriminer |
| **O4** | *Un rangement partiel des actions en considérant l'incomparabilité* ($\{\succ, \sim, \succ^{f}, ?\}$ : une structure de préordre partiel) : cet output reprend l'idée de l'output précédent tout en considérant qu'il est possible de ne pas pouvoir discriminer entre certaines actions : on accepte l'incomparabilité. |
| **O5** | *Choix de la meilleure action* ou d'une classe d'équivalence des meilleures actions. |
| **O6** | *Choix d'un sous-ensemble d'actions* parmi lesquelles se trouve(nt) la (les) meilleure(s) action(s). |
| **O7** | *Tri ordonné* : affecter les actions à des catégories prédéfinies et ordonnées. |

*Tableau A2-7 : Tableau de caractérisation des outputs (Guitouni et al., 1999)*

Face à la multiplicité des méthodes d'analyse multicritère, nous avons choisi, pour notre recherche, de privilégier les méthodes reposant sur la relation de surclassement pour les raisons suivantes :

- Les méthodes de surclassement permettent de prendre en compte des critères aussi bien quantitatifs que qualitatifs, ce qui est le cas de notre recherche ;
- Les méthodes de surclassement permettent de garder les évaluations de chaque action sur l'échelle originale d'évaluation, au contraire d'autres méthodes comme MAUT, MAVT qui exigent une même échelle pour tous les critères ;
- Les méthodes de surclassement permettent de compenser la mauvaise évaluation d'une action selon un critère par la bonne performance de cette action selon un autre critère ;

- Enfin, les méthodes de surclassement permettent, lors de l'évaluation des actions à l'aide de critères, de prendre en compte l'imprécision des connaissances par l'introduction de seuils d'indifférence et de préférence. Comme nous l'avons dit, le critère de « *performance* » présente des imprécisions associées à l'emploi de la note MARION dans son évaluation, il faut tenir compte de ces imprécisions pour exploiter les résultats de manière pertinente.

Pour choisir parmi les différentes méthodes de surclassement, dont les caractéristiques sont synthétisées dans le tableau A2-8, (Roy et Bouyssou, 1993) propose un guide basé en les étapes suivantes :

- L'homme d'étude peut commencer par faire intervenir la problématique retenue pour restreindre l'ensemble des méthodes a priori envisageables. Faisons observer que, dans le cas de la *problématique de tri* (P.β.), il n'aura actuellement plus guère de possibilité de choix (tableau A2-8). Ce qui suit ne concerne donc que les problématiques de *choix* (P.α.) et de *rangement* (P.γ).
- On pourra restreindre encore l'éventail des méthodes possibles en prenant en considération les divers paramètres économiques (poids, seuils de véto et seuils de discrimination principalement) qu'il convient ou non de faire intervenir. Les options prises à ce niveau dépendent de la nature du problème mais aussi de la façon dont il est pris en compte par les divers intervenants et de l'information disponible.

  Le choix d'une méthode sera ainsi considérablement restreint s'il existe de bonnes raisons pour ne pas faire intervenir de pondérations, les seuils de véto, les seuils d'indifférence ou de préférence. Il pourra cependant être préférable de recourir à une méthode plus simple : par exemple ELECTRE I ou ELECTRE II dans le cas où tous les critères sont des « *vrais critères* ».

  Soulignons que, dans certains cas, la nécessité de recourir à une méthode simple ou encore familière à certains des intervenants peut imposer le choix d'une méthode, même si cela doit exclure la prise en compte de tel ou tel paramètre économique.
- Il est possible que l'homme d'étude ait encore, à ce niveau, le choix entre plusieurs méthodes. Il pourra alors faire intervenir sa subjectivité pour les différentes méthodes, lesquelles, jointes à quelques considérations d'ordre technique (tableau A2-8), lèveront généralement sans peine ses dernières hésitations.

Le tableau A2-8 présente, de façon synthétique, divers éléments caractéristiques des méthodes de surclassement à prendre en compte pour réaliser le choix :

| **Méthodes** | **Problématique** | **Paramètres économiques** | | | **Caractéristiques du s.r.p.** |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **Seuils d'indifférence, préférence** | **Pondération** | **Véto** | |
| ELECTRE I | α | Non | Oui | Oui | 1 relation nette de surclassement avec niveau de concordance |
| ELECTRE Is | α | Oui | Oui | oui | 1 relation nette de surclassement avec niveau de concordance +1 (éventuel) indicateur de robustesse |
| ELECTRE TRI | β | Oui | Oui | Oui | 1 relation nette de surclassement + des profils limites |
| ELECTRE II | γ | Non | Oui | oui | 2 relations emboîtées de surclassement avec niveaux de concordance |
| PROMETHEE | γ | Oui | Oui | non | 1 relation floue de préférence |
| ELECTRE III | γ | Oui | Oui | oui | 1 relation floue de surclassement |
| ELECTRE IV | γ | Oui | Non | Oui | De 2 à 5 relations emboîtées de surclassement |

*Tableau A2-8 : Caractéristiques des principales méthodes de type ELECTRE (Roy et Bouyssou, 1993)*

# Annexe 3. Analyse Structurelle des tunnels en maçonnerie

Dans cette annexe, nous présentons les Analyses Structurelles que nous avons réalisées sur les différentes sections de tunnels maçonnés qui existent et énumérons les différentes sections de tunnels maçonnés présents sur le réseau RATP.

Cette analyse permet de lister tous les composants constitutifs du système, de repérer leur position physique au sein de l'ouvrage et de déterminer les interactions avec les autres composants. Elle consiste à découper l'ouvrage en composants ou sous-composants (ou matériaux), afin d'en construire une vision plus précise. Dans notre analyse, le découpage est effectué à la granularité du composant.

Dans cette annexe, nous présentons l'Analyse Structurelle que nous avons réalisée sur chaque catégorie de tunnel maçonné qui existe au sein du réseau RATP en fonction de l'environnement où il se trouve :

- Souterrain à deux voies, type courant ;
- Traversée de carrières ;
- Modifications des profils types affectés par la nappe phréatique.

A partir de ces résultats, nous proposons une simplification de tous les cas dans une seule section fictive, représentative de tous les cas existants. Cette section fictive représente le modèle d'étude sur lequel nous basons les analyses postérieures.

## A3.1 Souterrain à deux voies, type courant

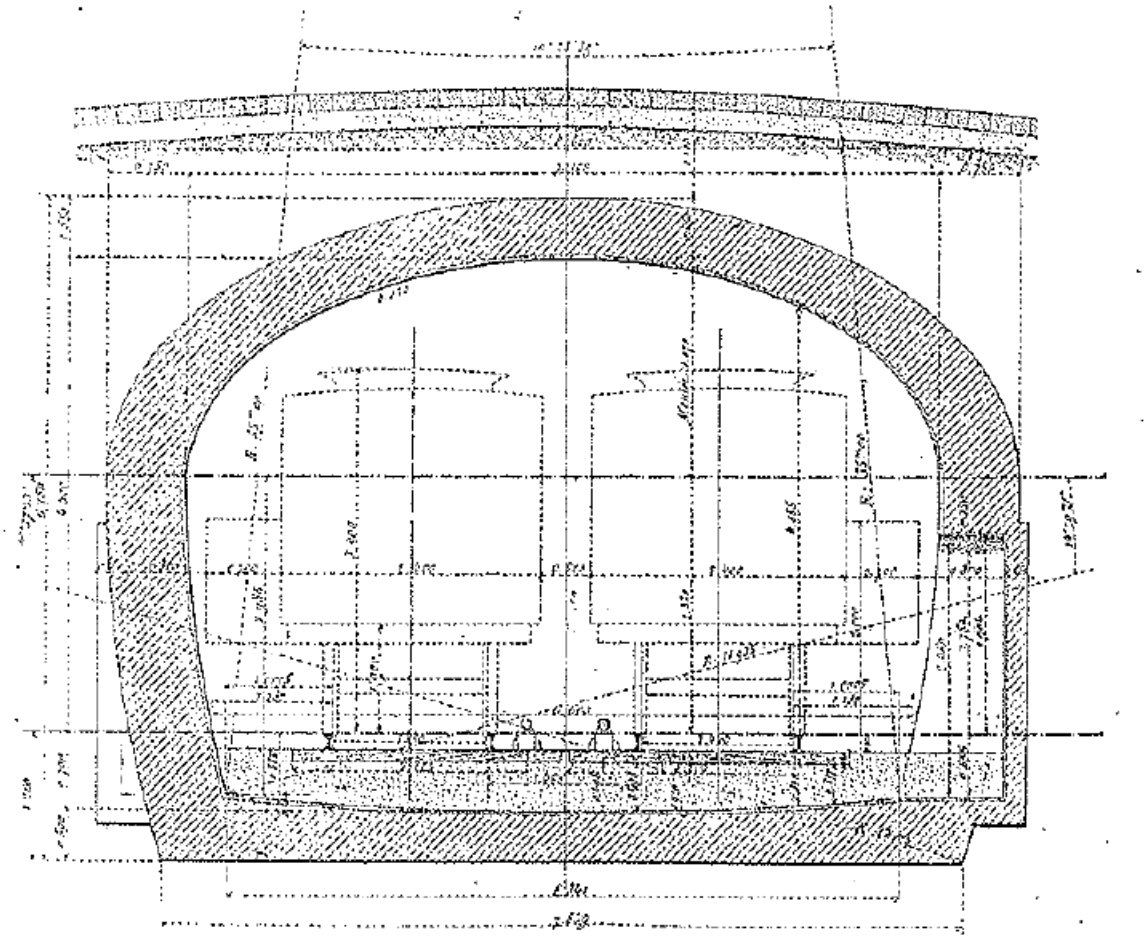


*Figure A3-1 : Section de tunnel maçonné à deux voies, type courant (Biette, 1928)*

Liste de composants :

| N° | Composant | Nature possible |
|---|---|---|
| 1 | Bois de blindage | Bois |
| 2 | Voûte | Maçonnerie de meulière ou pierres calcaires |
| 3 | Piédroit | Maçonnerie en béton grossier |
| 4 | Radier | Maçonnerie en béton grossier |
| 5 | Enduit | Ciment |
| 6 | Drains | (Vide) |

## A3.2 Traversée de carrières

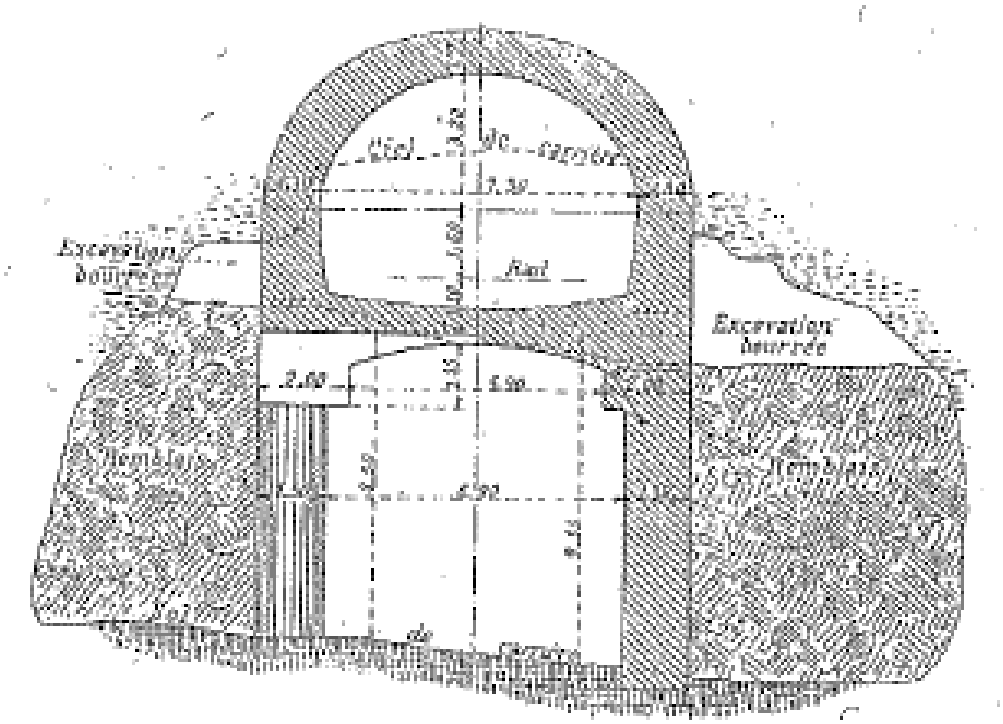



*Figure A3-2 : Section de tunnel maçonné, traversée de carrières (Biette, 1928)*

Liste de composants :

| N° | Composant | Nature possible |
|---|---|---|
| 1 | Bois de blindage | Bois |
| 2 | Voûte | Maçonnerie de meulière ou pierres calcaires |
| 3 | Piédroit | Maçonnerie en béton grossier |
| 4 | Radier | Maçonnerie en béton grossier |
| 5 | Drains | (Vide) |
| 6 | Enduit | Ciment |
| 7 | Renforcement en zone de carrières | Béton armé |

# A3.3 Modifications des profils affectés par la nappe phréatique

## A3.3.1 Profil affecté partiellement par la nappe phréatique

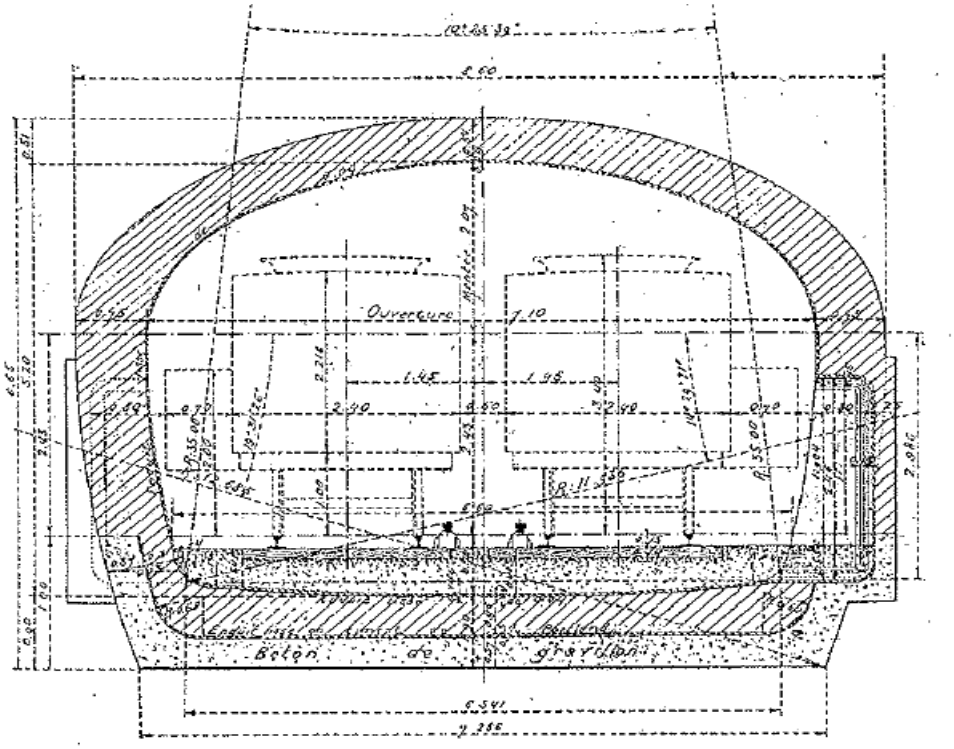



*Figure A3-3 : Section de tunnel maçonné, profil affecté partiellement par la nappe phréatique (Biette, 1928)*

Liste de composants :

| N° | Composant | Nature possible |
|---|---|---|
| 1 | Bois de blindage | Bois |
| 2 | Voûte | Maçonnerie de meulière ou pierres calcaires |
| 3 | Piédroit | Maçonnerie en béton grossier |
| 4 | Radier | Maçonnerie en béton grossier |
| 5 | Drains | (Vide) |
| 6 | Enduit | Ciment |
| 7 | Rouleau inférieur | Brique ou béton gravillon |
| 8 | Rouleau supérieur | Brique ou béton gravillon |

### A3.3.2 Profil renforcé affecté partiellement par la nappe phréatique

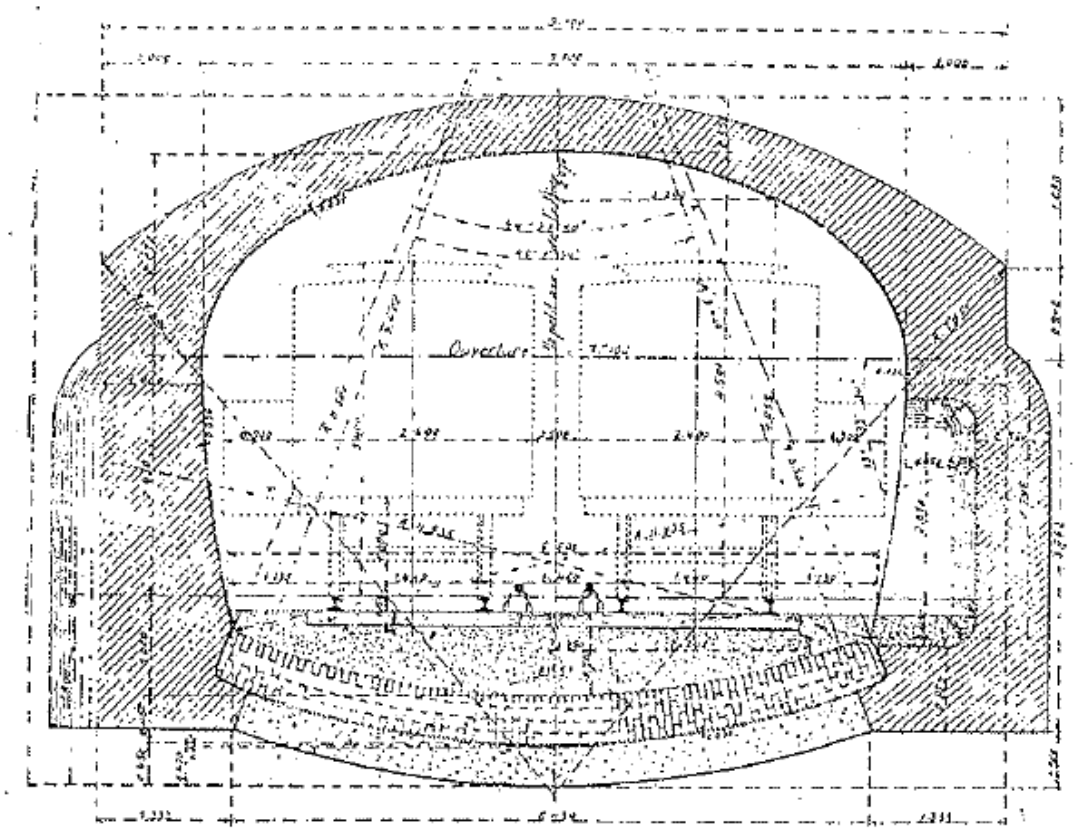



*Figure A3-4 : Section de tunnel maçonné, profil renforcé affecté partiellement par la nappe phréatique (Biette, 1928)*

Liste de composants :

| N° | Composant | Nature possible |
|---|---|---|
| 1 | Bois de blindage | Bois |
| 2 | Voûte | Maçonnerie de meulière ou pierres calcaires |
| 3 | Piédroit | Maçonnerie en béton grossier |
| 4 | Radier | Maçonnerie en béton grossier |
| 5 | Drains | (Vide) |
| 6 | Enduit | Ciment |
| 7 | Rouleau inférieur | Brique ou béton gravillon |
| 8 | Rouleau supérieur | Brique ou béton gravillon |

### A3.3.3 Profil renforcé affecté complètement par la nappe phréatique

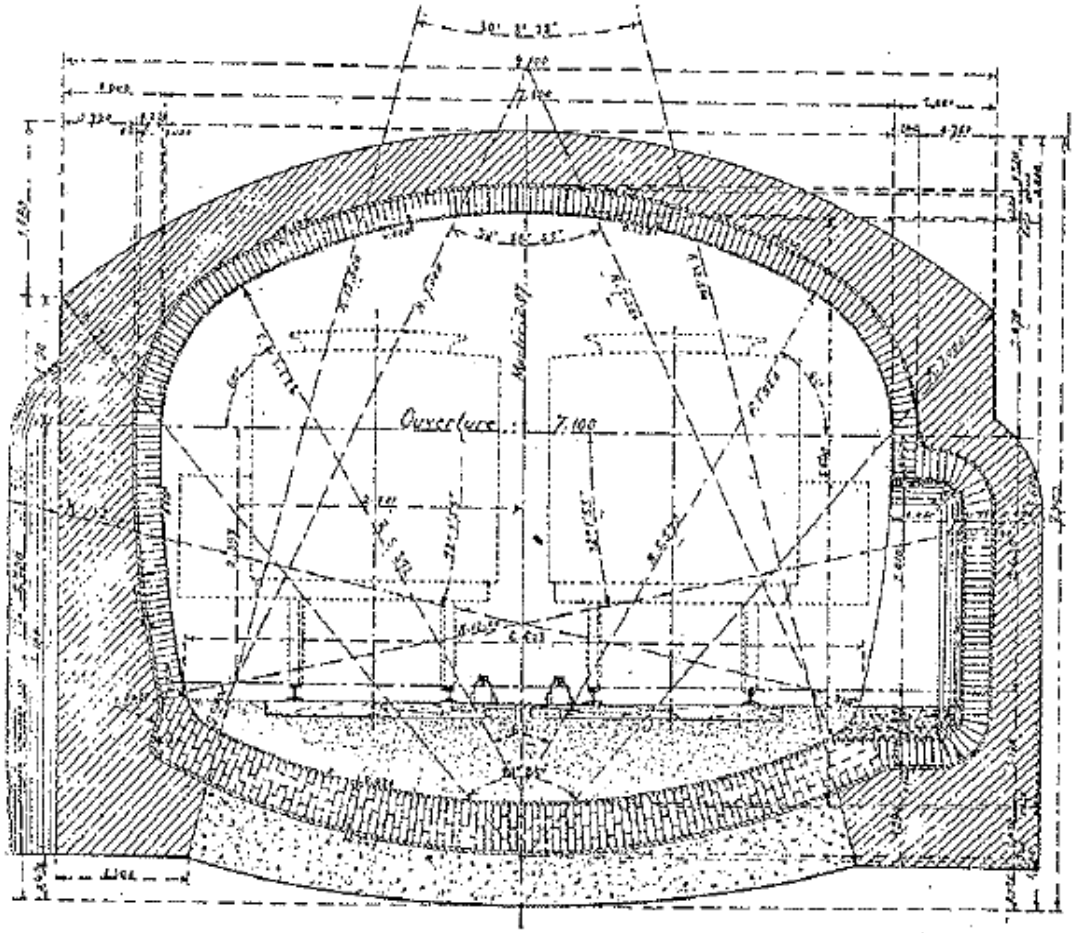


*Figure A3-5 : Section de tunnel maçonné, profil renforcé affecté complètement par la nappe phréatique (Biette, 1928)*

Liste de composants :

| N° | Composant | Nature possible |
|---|---|---|
| 1 | Bois de blindage | Bois |
| 2 | Voûte | Maçonnerie de meulière ou pierres calcaires |
| 3 | Piédroit | Maçonnerie en béton grossier |
| 4 | Radier | Maçonnerie en béton grossier |
| 5 | Drains | (Vide) |
| 6 | Enduit | Ciment |
| 7 | Revêtement intérieur | Brique ou béton gravillon |

## A3.4 Section d'étude

A partir des résultats précédents, nous avons créé une section d'étude qui comprend tous les composants identifiés afin de que notre analyse structurelle soit représentative de tous les cas existants (fig. A3-6).

Les composants permanents du système sont représentés par un trait foncé. Ceux qui ne sont présents qu'en fonction de l'environnement dans lequel ils se trouvent (contact avec la nappe phréatique, carrières, etc.) sont représentés par un trait pointillé (les éléments extérieurs au système sont représentés par un trait rouge).

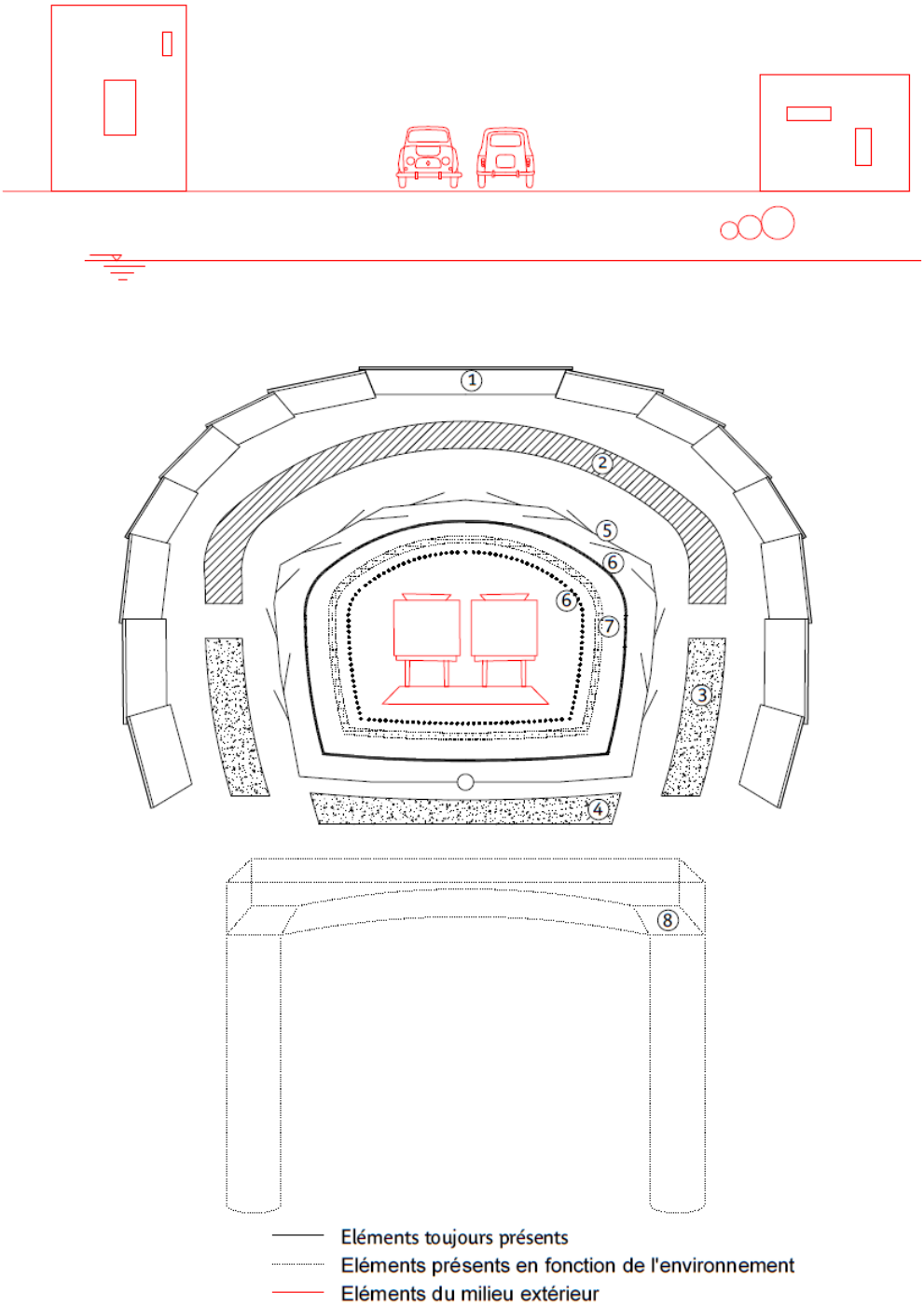



*Figure A3-6 : Section d'étude*

A partir de l'Analyse Structurelle de ce modèle d'étude, nous déterminons l'ensemble des composants, regroupés dans un tableau ci-dessous :

| **N°** | **Composant** | **Nature possible** |
|---|---|---|
| 1 | Bois de blindage | Bois |
| 2 | Voûte | Maçonnerie de meulière ou pierres calcaires |
| 3 | Piédroit | Maçonnerie en béton grossier |
| 4 | Radier | Maçonnerie en béton grossier |
| 5 | Drains | (Vide) |
| 6 | Enduit | Ciment |
| 7 | *Revêtement intérieur (en cas de contact avec la nappe phréatique)** | Brique ou béton gravillon |
| 8 | *Renforcement en zone de carrières** | Béton armé |

* Eléments présents en fonction de l'environnement

Nous obtenons huit composants pour notre modèle d'étude. A chacun d'entre eux sont associés un numéro de nomenclature et une description de la nature des matériaux pouvant rentrer dans la constitution des composants.

# Annexe 4. Les Blocs diagrammes Fonctionnels des tunnels en maçonnerie

Les Blocs diagrammes Fonctionnels (BdF) matérialisent les relations entre les différents composants et celles entre les composants et les milieux extérieurs. Ils permettent de dégager les interactions et les flux suivants :

- Les interactions et les flux entre les composants et les milieux extérieurs ;
- Les interactions et les flux entre les composants eux-mêmes ;
- Les interactions et les flux entre deux éléments extérieurs, via des composants du système.

Ces interactions permettent d'obtenir les fonctions principales du système et de mieux comprendre comment l'environnement peut dégrader le système et, à l'opposé, comment le système peut affecter son environnement en cas de défaillance.

Ces interactions sont matérialisées au moyen des BdF, constitués par les différents milieux extérieurs et par les composants du système découlant de l'analyse structurelle (Annexe 1). Chaque flux est symbolisé par un arc, le sens d'un flux étant indiqué par une flèche. Nous avons distingué les flux appliqués directement sur un composant (trait continu) et les flux transmis depuis un composant vers un autre via un composant tiers (trait en pointillés).

Enfin, afin de bien mettre en valeur les flux importants, nous avons associé à chaque type de flux une épaisseur différente selon son importance (un trait épais indique un flux important).

Les quatre principaux BdF concernent les catégories de relations suivantes :

- Les relations de contact (contacts entre les éléments et l'environnement) ;
- Les relations de flux hydrauliques (circulation de l'eau) ;
- Les relations de flux de charges (forces agissantes) ;
- Les relations de flux liés aux sollicitations hydromécaniques (érosion et colmatage).

Au final, chaque BdF a ses particularités :

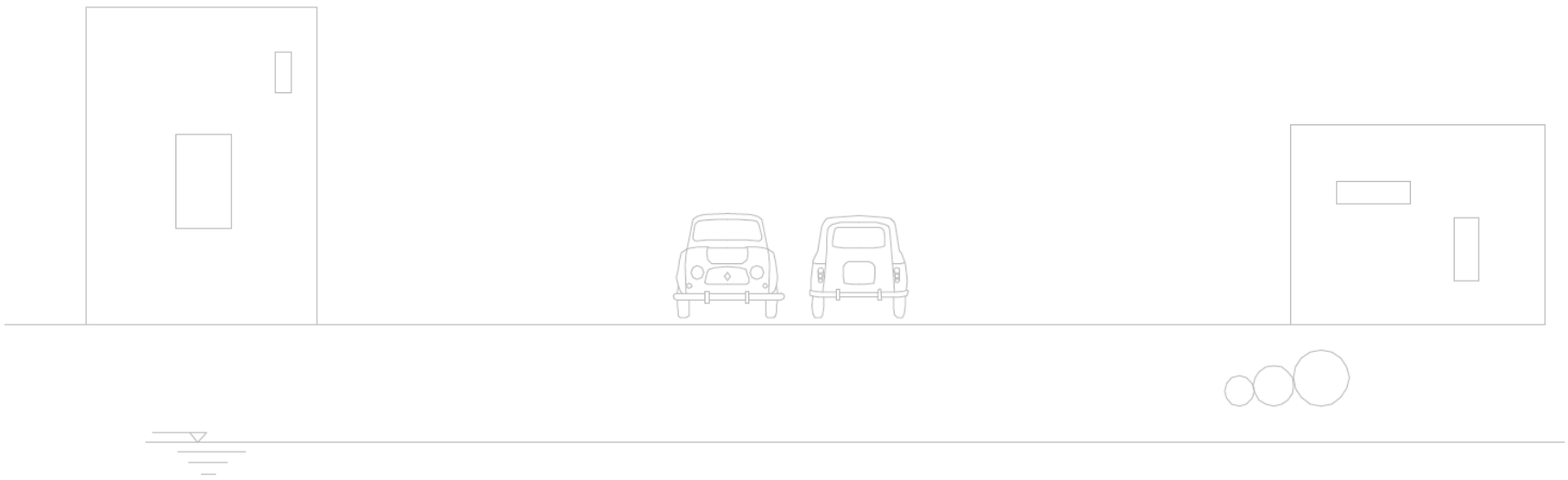
***BdF définissant les relations de contact***
Ce BdF indique l'ensemble des contacts entre les composants entre eux, et entre les composants et les milieux extérieurs. Il permet par la suite d'examiner les fonctions de contact (assurer l'appui entre composants, par exemple), mais aussi les transferts possibles de flux entre les composants (fig. A4-1).

***BdF définissant les relations de flux de charges***
Ce Bloc diagramme Fonctionnel met en évidence les différentes actions extérieures agissant sur chaque composant du tunnel maçonné. Nous distinguons les charges routières, les charges d'exploitation, les effets de l'encaissant et la pression hydrostatique (fig. A4-2).

***Bdf définissant les relations de flux hydrauliques***
Les flux hydrauliques reflètent les circulations d'eau dans l'état normal de fonctionnement du tunnel maçonné. Nous représentons les flux qui seraient susceptibles d'apparaître ainsi que leur origine : flux provenant de la voirie, des réseaux divers ou de la nappe phréatique (fig. A4-3).

***BdF définissant les relations des flux liées aux sollicitations hydromécaniques***

Nous distinguons ici les relations qui mettent en jeu les mécanismes d'altération physico-chimique des matériaux des composants et les mécanismes de colmatage dus au transport des matériaux par l'eau (fig. A4-4).



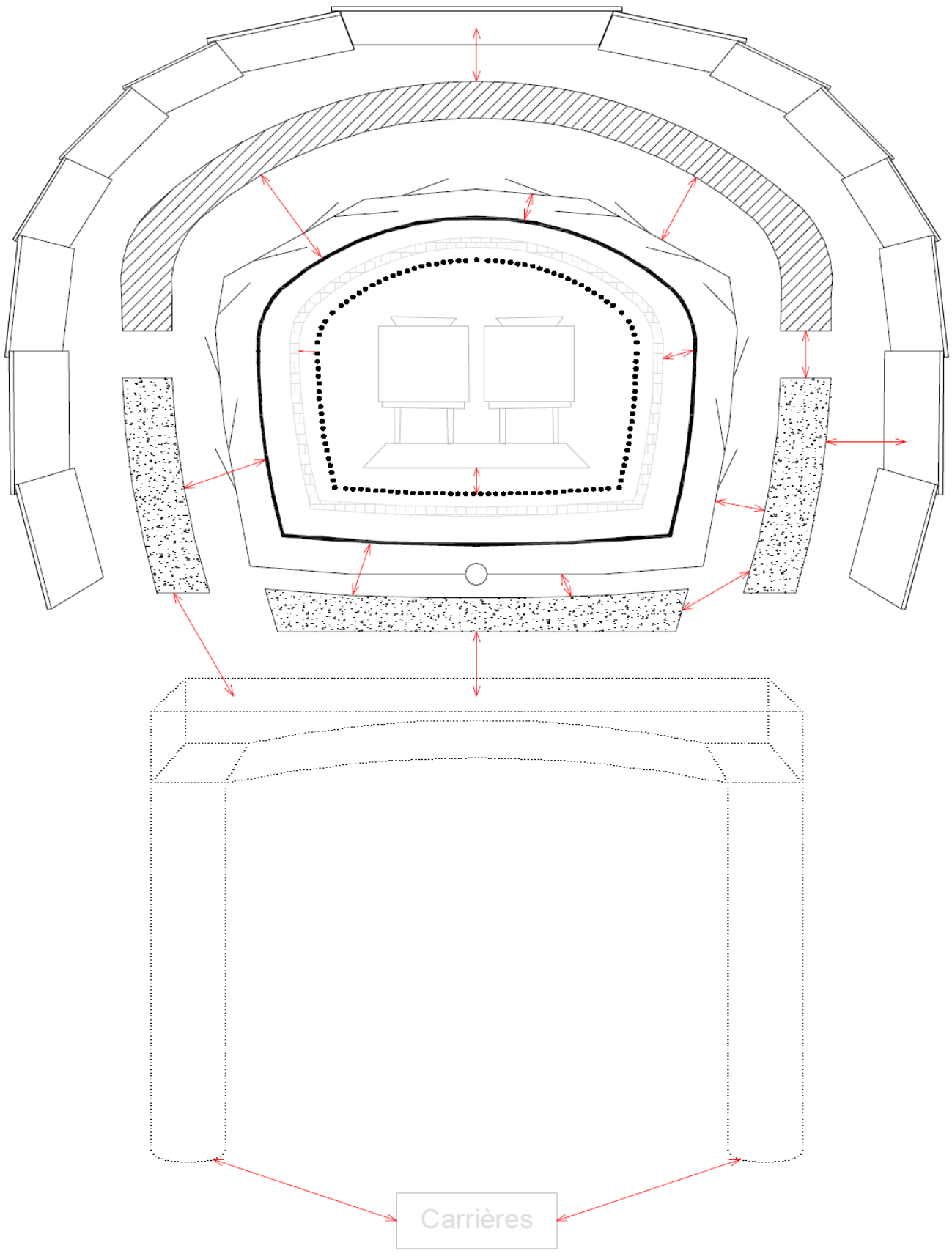



*Figure A4-1 : Bloc diagramme Fonctionnel relatif aux interactions de contact*

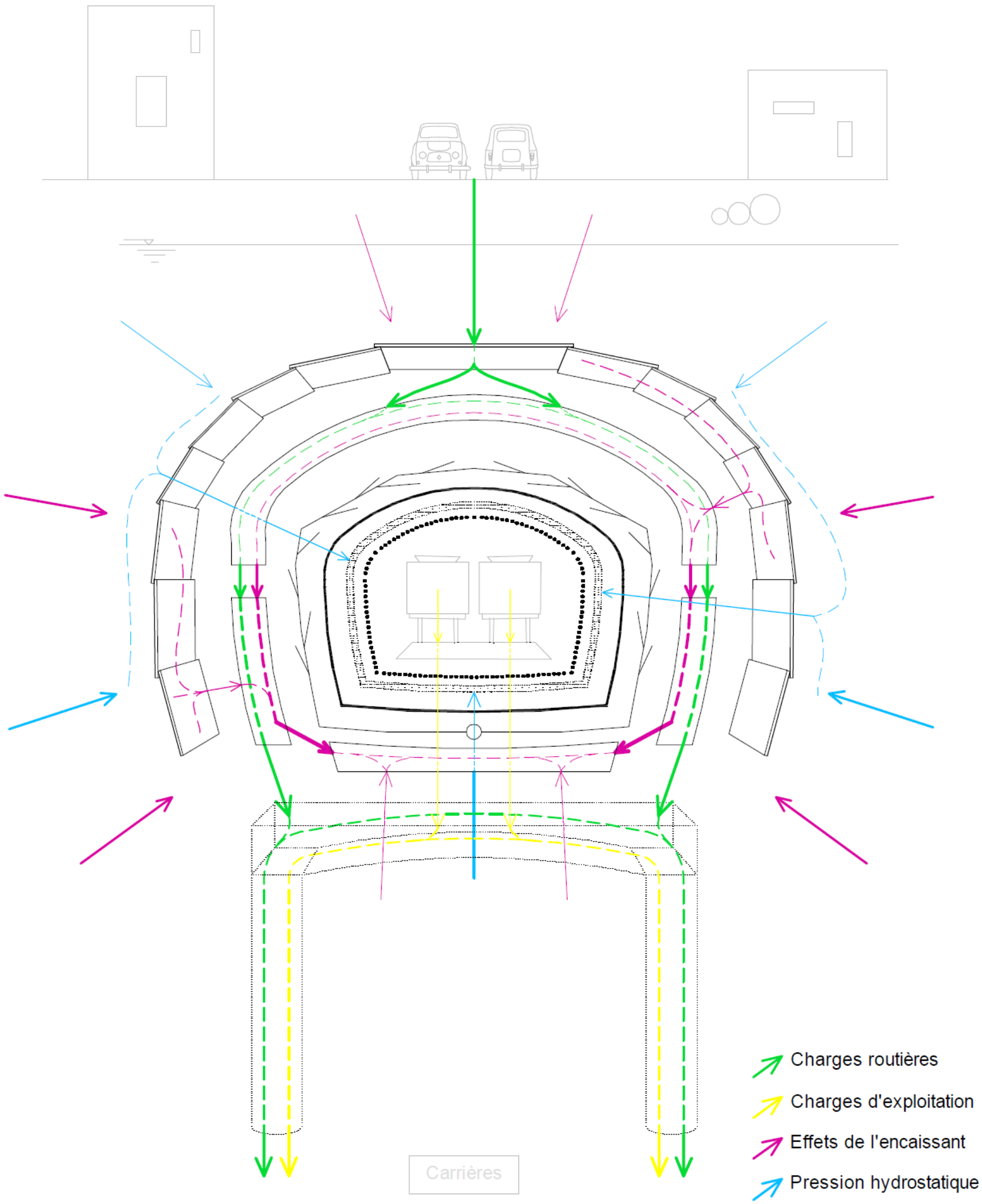



*Figure A4-2 : Bloc diagramme Fonctionnel relatif aux interactions de flux de charges*

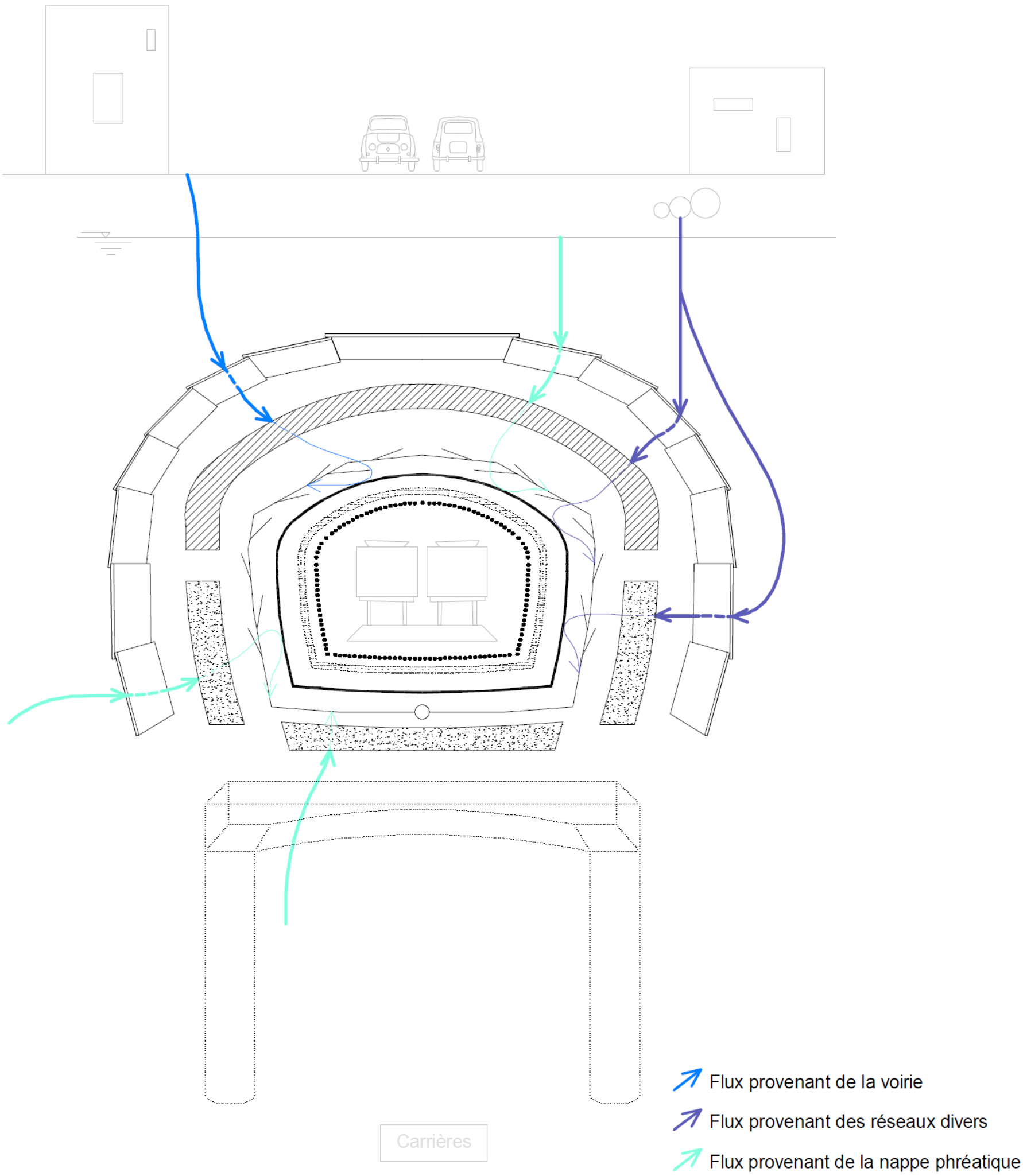



*Figure A4-3 : Bloc diagramme Fonctionnel relatif aux interactions de flux hydrauliques*

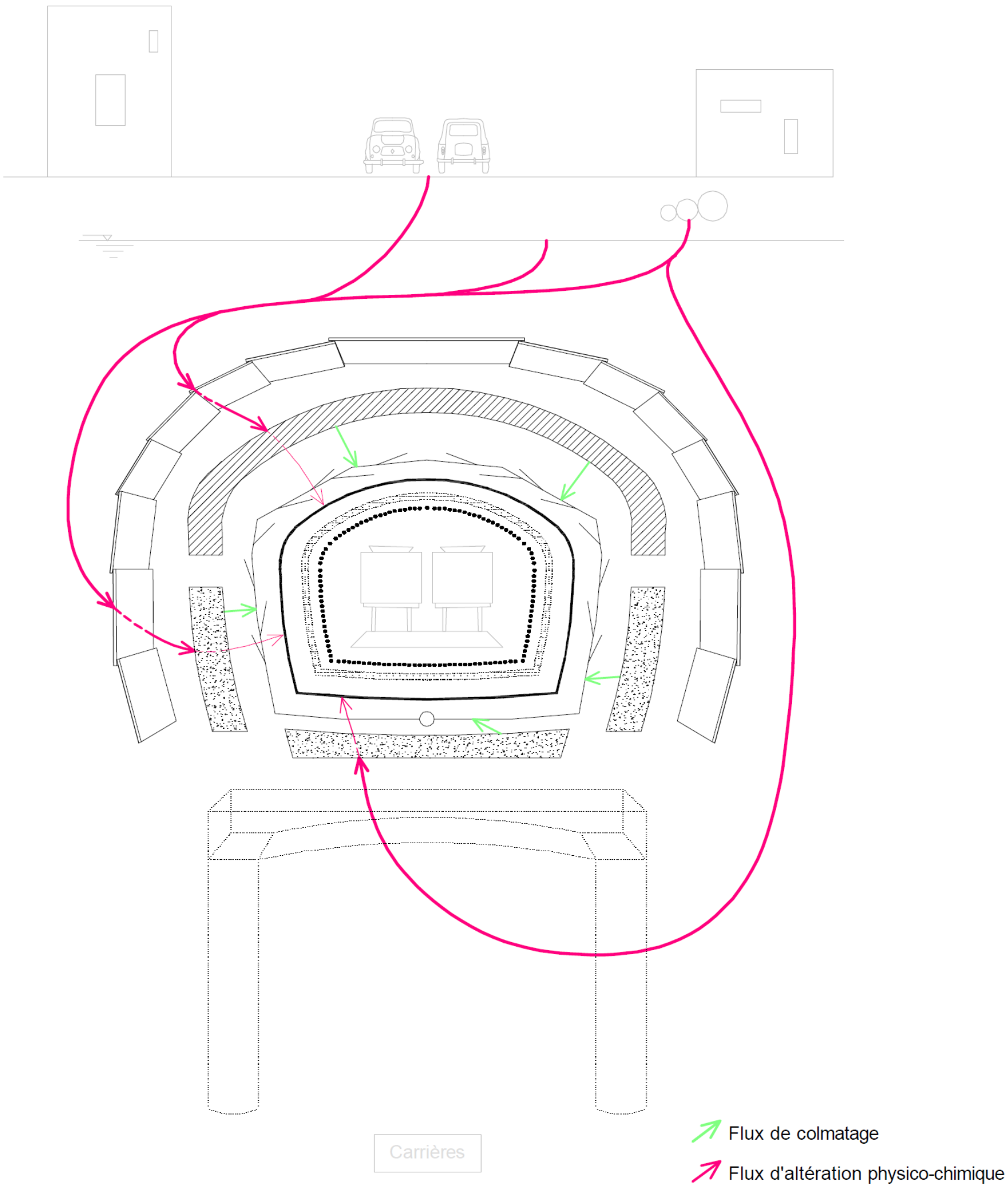



*Figure A4-4 : Bloc diagramme Fonctionnel relatif aux interactions de flux hydromécaniques*

# Annexe 5. L'Analyse Fonctionnelle des tunnels en maçonnerie

Les Blocs diagrammes Fonctionnels nous ont permis de formaliser les interactions de contact et de flux entre les composants et les éléments du milieu extérieur. A partir de ces résultats, nous avons pu identifier et lister les fonctions de conception des composants du système.

A partir des blocs diagrammes fonctionnels, nous déterminons les fonctions de conception des composants du système. Elles correspondent, pour chaque composant de granularité intermédiaire, aux réactions face aux interactions de contact et de flux avec les autres composants et les milieux extérieurs. Nous distinguons ainsi deux catégories de fonctions de conception : les fonctions de contact et les fonctions de flux.

Les différentes interactions entre les composants conduisent à distinguer les fonctions de conception suivantes :

***Fonctions liées à des contacts :***
Nous distinguons trois catégories de fonctions liées aux contacts :

- Assurer l'appui pour des composants (entre eux ou avec le milieu extérieur) ;
- Assurer l'adhérence entre composants ;
- Assurer la protection des composants voisins du composant considéré.

Nous regroupons ces fonctions dans une seule syntaxe :

- ***Préparer les éléments en contact***

***Fonctions liées aux flux de charges :***
Les flux de charges induisent des fonctions de résistance aux sollicitations mécaniques et des fonctions de transmission de sollicitations mécaniques provenant de différents milieux extérieurs. On trouve :

- La transmission des charges entre composants ou entre composants et le milieu extérieur ;
- Les effets de l'encaissant ;
- Les charges provenant de la voirie ;
- Les charges d'exploitation (circulation) ;
- La charge hydrostatique, dans le cas où le tunnel est en contact avec la nappe phréatique.

Nous regroupons ces fonctions dans deux syntaxes :

- ***Résister aux sollicitations de charges***
- ***Transmettre les sollicitations de charges***

***Fonctions liées à des flux hydrauliques :***
Elles sont induites par la circulation de l'eau dans le système. Nous distinguons les fonctions suivantes :

- Limiter les infiltrations provenant d'un composant ou d'un milieu extérieur et se dirigeant vers un autre composant ou vers le milieu extérieur ;
- Empêcher l'écoulement des eaux sur un composant ou assurer l'étanchéité d'un composant ;

- Collecter les eaux d'infiltration d'un composant (ou du milieu extérieur) vers un autre;
- Evacuer les eaux d'infiltration provenant d'un composant ou d'un milieu extérieur ;

Nous regroupons ces fonctions dans trois syntaxes :

- ***Limiter les flux hydrauliques***
- ***Collecter les flux hydrauliques***
- ***Evacuer les flux hydrauliques***

***Fonctions liées aux sollicitations hydromécaniques :***
Ces sollicitations existent là où il y a possibilité d'infiltration d'eau. Nous en distinguons de trois types :

- Etre durable face aux variations d'humidité ;
- Résister aux altérations physico-chimiques provoquées par les eaux d'infiltration;
- Etre durable face au colmatage dû aux transports de matériaux par les eaux d'infiltration ou de drainage.

Nous regroupons ces fonctions dans une seule syntaxe :

- ***Résister aux flux hydromécaniques***

Sur la base de cette classification, nous regroupons dans les Tableaux d'Analyse Fonctionnelle l'ensemble des fonctions de conception accomplies par les composants, en considérant l'ensemble des interactions.

| N° | Composant | Fonctions de conception |
|---|---|---|
| 1 | **Bois de blindage** | **5. Préparer les éléments en contact :**<br>- Assurer le contact entre le terrain encaissant et le revêtement |
| | | **6. Résister aux sollicitations des charges :**<br>- Assurer la stabilité du terrain encaissant lors du creusement du tunnel* |
| | | **7. Transmettre les sollicitations des charges :**<br>- Transmettre les efforts de l'encaissant vers le revêtement<br>- Transmettre les charges de la voirie vers la voûte |
| | | **8. Résister aux flux hydromécaniques :**<br>- Etre durable face aux variations d'humidité qui provoquent sa pourriture et dégradation |

** Cette fonction correspond à la phase de construction des tunnels maçonnés. Même si notre AMDE se concentre uniquement sur la phase d'exploitation de l'ouvrage, on considère convenable de l'indiquer quand même, afin de mieux représenter les particularités de fonctionnement de ce composant.*

| N° | Composant | Fonctions de conception |
|---|---|---|
| 2 | **Voûte** | **1. Préparer les éléments en contact :**<br>- Assurer l'appui sur les piédroits<br>- Préparer la surface de contact des drains<br>- Assurer l'adhérence de l'enduit |
| | | **2. Résister aux sollicitations des charges :**<br>- Résister aux efforts de l'encaissant transmis par le bois de blindage<br>- Résister aux charges de la voirie transmises par le bois de blindage<br>- *(Résister à la pression hydrostatique en cas de contact avec la nappe phréatique)* |
| | | **3. Transmettre les sollicitations des charges :**<br>- Transmettre les sollicitations mécaniques vers les piédroits<br>- *(Transmettre la pression hydrostatique vers le revêtement intérieur en cas de contact avec la nappe phréatique)* |
| | | **4. Limiter les flux hydrauliques :**<br>- Limiter les infiltrations (provenant de la voirie, des réseaux divers ou de la nappe phréatique) |
| | | **5. Résister aux flux hydromécaniques :**<br>- Résister à l'altération physico-chimique provoquée par les eaux d'infiltration (provenant de la voirie, des réseaux divers ou de la nappe phréatique) |
| 3 | **Piédroits** | **1. Préparer les éléments en contact :**<br>- Assurer l'appui de la voûte<br>- Assurer le contact avec le radier<br>- Préparer la surface de contact des drains<br>- Assurer l'adhérence de l'enduit<br>- Assurer l'appui sur le terrain encaissant<br>- *(Préparer la surface de contact du renforcement en zone de carrières)* |
| | | **2. Résister aux sollicitations des charges :**<br>- Résister aux efforts de l'encaissant<br>- Résister aux efforts transmis par la voûte<br>- *(Résister à la pression hydrostatique en cas de contact avec la nappe phréatique)* |
| | | **3. Transmettre les sollicitations des charges :**<br>- Transmettre les sollicitations reçues de la voûte vers le terrain encaissant en assurant le non-poinçonnement du sol<br>- Transmettre les efforts de l'encaissant vers le radier<br>- *(Transmettre les charges de pesanteur vers le renforcement en zone de carrières)* |
| | | **4. Limiter les flux hydrauliques :**<br>- Limiter les infiltrations (provenant de la voirie, des réseaux divers ou de la nappe phréatique) |
| | | **5. Résister aux flux hydromécaniques :**<br>- Résister à l'altération physico-chimique provoquée par les eaux d'infiltration (nappe phréatique, voirie et réseaux divers) |

| N° | Composant | Fonctions de conception |
|---|---|---|
| 4 | **Radier** | **1. Préparer les éléments en contact :**<br>- Assurer l'appui sur le terrain encaissant<br>- Assurer le contact avec les piédroits<br>- Préparer la surface de contact des drains<br>- Assurer l'adhérence de l'enduit<br>- Assurer l'appui de la plateforme de roulement<br>- *(Assurer le contact avec le renforcement en présence de carrières)* |
| | | **2. Résister aux sollicitations des charges :**<br>- Résister aux charges d'exploitation transmises par la plateforme de roulement<br>- Résister aux efforts de l'encaissant transmis par les piédroits<br>- *(Résister à la pression hydrostatique en cas de contact avec la nappe phréatique)* |
| | | **3. Transmettre les sollicitations des charges :**<br>- Transmettre les charges d'exploitation vers le terrain encaissant<br>- *(Transmettre les charges d'exploitation vers le renforcement en présence de carrières)* |
| | | **4. Limiter les flux hydrauliques :**<br>- Limiter les infiltrations (provenant de la voirie, des réseaux divers ou de la nappe phréatique) |
| | | **5. Résister aux flux hydromécaniques :**<br>- Résister à l'altération physico-chimique provoquée par les eaux d'infiltration (provenant de la voirie, des réseaux divers ou de la nappe phréatique) |
| 5 | **Drains** | **1. Préparer les éléments en contact :**<br>- Préparer la surface de contact de la voûte<br>- Préparer la surface de contact des piédroits<br>- Préparer la surface de contact du radier<br>- Préparer la surface de contact de l'enduit |
| | | **2. Collecter les flux hydrauliques :**<br>- Collecter les eaux d'infiltration |
| | | **3. Evacuer les flux hydrauliques :**<br>- Evacuer les eaux collectées vers les puits d'épuisement ou le milieu extérieur |
| | | **4. Résister aux flux hydromécaniques :**<br>- Etre durable face au colmatage dû aux transports de matériaux par les eaux d'infiltration |

| N° | Composant | Fonctions de conception |
|---|---|---|
| 6 | **Enduit** | **1. Préparer les éléments en contact :**<br>- Etre adhérant au revêtement<br>- Préparer la surface de contact des drains<br>- Corriger les défauts visuels |
| | | **2. Limiter les flux hydrauliques :**<br>- Empêcher l'écoulement des eaux sur les équipements électriques et trottoirs de manœuvre<br>- *(Empêcher l'écoulement des eaux vers le revêtement intérieur)* |
| | | **3. Collecter les flux hydrauliques :**<br>- Orienter les eaux d'infiltration vers les drains |
| | | **4. Résister aux flux hydromécaniques :**<br>- Résister à l'altération physico-chimique provoquée par les eaux d'infiltration (provenant de la voirie, des réseaux divers ou de la nappe phréatique) |
| 7 | ***Revêtement intérieur (en cas de contact avec la nappe phréatique)*** | **1. Préparer les éléments en contact :**<br>- Protéger l'enduit de l'érosion |
| | | **2. Résister aux sollicitations des charges :**<br>- Renforcer le revêtement pour résister à la pression hydrostatique |
| 8 | ***(Renforcement en zone de carrières)*** | **1. Préparer les éléments en contact :**<br>- Assurer le contact avec le radier<br>- Assurer le contact avec le sol des carrières |
| | | **2. Résister aux sollicitations des charges :**<br>- Résister aux sollicitations mécaniques transmises par le radier et les piédroits |
| | | **3. Transmettre les sollicitations des charges :**<br>- Transmettre les sollicitations mécaniques vers le sol des carrières |

# Annexe 6. L'Analyse des Modes de Défaillance et leurs Effets des tunnels en maçonnerie

L'AMDE comprend généralement trois analyses :

- L'AMDE Produit, qui vérifie que le système assure en phase d'exploitation de façon satisfaisante les fonctions pour lesquelles il est conçu ;
- L'AMDE Processus. Cette analyse examine si le produit obtenu est bien conforme à ce qui est prévu. Elle identifie les modes de défaillance liés à la conception et à la réalisation du système ;
- L'AMDE Moyen est plus rarement réalisée pour rechercher les moyens à mettre en œuvre.

Dans un contexte de gestion de patrimoine, on s'intéresse uniquement aux ouvrages en service. C'est pour cela que nous allons appliquer l'AMDE aux tunnels maçonnés en phase d'exploitation. L'AMDE Produit est l'outil la plus adapté à nos besoins. Le reste ne présente pas d'intérêt pour les objectifs de la thèse (on vise à optimiser la maintenance des ouvrages en service. L'amélioration de la conception ou de la construction des tunnels ne concerne pas notre recherche).

Comme pour l'Analyse Fonctionnelle, nous appliquons l'AMDE Produit à l'échelle de la granularité intermédiaire : les modes de défaillance, leurs effets et leurs causes possibles sont examinés au niveau du composant.

Afin d'obtenir un tableau de résultats de l'AMDE le plus synthétique possible, nous avons adopté:

- Un classement des causes et effets dans les différentes familles mises en évidence lors de l'Analyse Fonctionnelle : l'état intrinsèque du composant, les contacts, les différents flux, le processus conception-réalisation ;
- Une utilisation des classifications et des terminologies proposées pour les fonctions, les phénomènes de cause et effet, et les symptômes.

Nous avions dans un premier temps réalisé une AMDE très exhaustive, qui envisageait des causes et effets des modes de défaillance très nombreux et divers. Il s'est avéré que le résultat obtenu n'était pas satisfaisant : tableaux très lourds, informations importantes non mises en évidence, phénomènes ne pouvant pas se produire, etc. Nous avons donc trié les informations obtenues, en collaboration avec les experts de la RATP, pour ne retenir au final que les causes et les effets pertinents, susceptibles d'apparaître dans les mécanismes de dégradation des tunnels maçonnés.

| N° | Composant | Fonctions de conception | Mode de Défaillance | Cause possible de la défaillance | Effet possible de la défaillance | Symptôme de la défaillance | Moyen de détection |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | **Bois de blindage** | **1. Préparer les éléments en contact :**<br>- Assurer le contact entre le terrain encaissant et le revêtement | La fonction « assurer le contact entre le terrain et la maçonnerie en service » est dégradée ou est défaillante | **Processus conception-réalisation**<br>- Méthode de construction<br><br>**Etat intrinsèque du composant**<br>- Pourrissement et décomposition du bois de blindage<br><br>**Contact**<br>- Vides à l'extrados par altération physico-chimique de l'encaissant | **Contact**<br>- Déformation de la section du tunnel | - Constat de vides en extrados<br>- Abaissement de la voûte<br>- Ecartement des piédroits<br>- Fissures longitudinales en clé de voûte<br>- Décollement d'enduit (ou du carrelage dans les points d'arrêt) dans la zone des reins de la voûte | - Carottages de reconnaissance<br>- Mesures topographiques<br>- Mesures topographiques<br>- Observation visuelle<br>- Fissuromètres<br><br>- Observation visuelle |
| | | **2. Résister aux sollicitations des charges :**<br>- Assurer la stabilité du terrain encaissant lors du creusement du tunnel[1] | La fonction « assurer la stabilité du terrain encaissant lors du creusement du tunnel » est dégradée ou est défaillante | **Processus conception-réalisation**<br>- Méthode de construction<br><br>**Flux de charges**<br>- Charges du terrain encaissant | **Contact**<br>- Vides à l'extrados<br>- Tassement du terrain<br><br>**Flux de charges**<br>- Modification des efforts du terrain encaissant | - Constat de vides en extrados<br>- Tassements de la voirie | - Carottages de reconnaissance<br>- Observation visuelle |

[1] Cette fonction correspond à la phase de construction des tunnels maçonnés. Même si notre AMDE se concentre uniquement sur la phase d'exploitation de l'ouvrage, on considère convenable de l'indiquer ici quand même, afin de mieux représenter les particularités de fonctionnement de ce composant.

| N° | Composant | Fonctions de conception | Mode de Défaillance | Cause possible de la défaillance | Effet possible de la défaillance | Symptôme de la défaillance | Moyen de détection |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | **Bois de blindage** | **3. Transmettre les sollicitations des charges :**<br>- Transmettre les efforts de l'encaissant vers le revêtement<br>- Transmettre les charges de la voirie vers la voûte | La fonction « transmettre les sollicitations des charges » est dégradée ou est défaillante | **Contact**<br>- Vides à l'extrados par altération physico-chimique de l'encaissant<br><br>**Etat intrinsèque du composant**<br>- Pourrissement et décomposition du bois | **Flux de charges**<br>- Modification des efforts du terrain encaissant<br>- Modification des contraintes au sein de la maçonnerie | - Ecartement des piédroits<br>- Abaissement de la voûte<br>- Fissures longitudinales en clé de voûte<br>- Fissures en radier<br>- Décollement d'enduit (ou du carrelage dans les points d'arrêt) dans la zone des reins de la voûte | - Mesures topographiques<br>- Mesures topographiques<br>- Observation visuelle<br>- Fissuromètres<br><br>- Observation visuelle<br>- Observation visuelle |
| | | **4. Résister aux flux hydromécaniques :**<br>- Etre durable face aux variations d'humidité qui provoquent sa pourriture et dégradation | La fonction « résister aux flux hydromécaniques » est dégradée ou est défaillante | **Processus conception-réalisation**<br>- Nature du bois<br>- Méthode de construction<br><br>**Flux hydrauliques**<br>- Variation d'humidité (à cause des infiltrations provenant de la voirie, réseaux divers et à la fluctuation de la nappe phréatique) | **Etat intrinsèque du composant**<br>- Pourrissement et décomposition du bois<br><br>**Contact**<br>- Vides à l'extrados<br><br>**Flux hydrauliques**<br>- Circulation d'eau entre terrain et maçonnerie | - Constat de vides en extrados<br>- Abaissement de la voûte<br>- Fissures longitudinales en clé de voûte<br>- Décollement d'enduit (ou du carrelage dans les points d'arrêt) dans la zone des reins de la voûte | - Carottages de reconnaissance<br>- Mesures topographiques<br>- Fissuromètres<br>- Observation visuelle<br><br>- Observation visuelle |

| N° | Composant | Fonctions de conception | Mode de Défaillance | Cause possible de la défaillance | Effet possible de la défaillance | Symptôme de la défaillance | Moyen de détection |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | **Voûte** | **1. Préparer les éléments en contact :**<br>- Assurer l'appui sur les piédroits<br>- Préparer la surface de contact des drains<br>- Assurer l'adhérence de l'enduit | La fonction « préparer les éléments en contact » est dégradée ou est défaillante | **Processus conception-réalisation**<br>- Méthode de construction (liaison entre voûte et piédroit au niveau des naissances)<br>- Mise en œuvre<br>- Défaut de clavage voûte-piédroit<br><br>**Contact**<br>- Divergence des piédroits<br>- Dégradation des naissances<br><br>**Etat intrinsèque du composant**<br>- Fissuration | **Contact**<br>- Perte de monolithisme originel du tunnel (formation de rotules au niveau des naissances) | - Fissures longitudinales en clé de voûte<br>- Décollement d'enduit (ou du carrelage dans les points d'arrêt) au niveau des reins de la voûte | - Fissuromètres<br>- Observation visuelle<br><br>- Observation visuelle |
| | | **2. Résister aux sollicitations des charges :**<br>- Résister aux efforts de l'encaissant transmis par le bois de blindage<br>- Résister aux charges de la voirie transmises par le bois de blindage<br>- *(Résister la pression hydrostatique en cas de contact avec la nappe phréatique)* | La fonction « résister aux sollicitations des charges » est dégradée ou défaillante | **Processus conception-réalisation**<br>- Composition<br>- Méthode de construction<br>**Etat intrinsèque du composant**<br>- Altération physico-chimique de la maçonnerie<br>- Vieillissement du matériau (perte de résistance des moellons)<br>- Déformation de la section du tunnel<br>- Fissuration de la voûte<br>**Flux de charges**<br>- Modification des efforts du terrain encaissant<br>- Etat des contraintes au sein de la maçonnerie<br>- Charges de la voirie<br>- *(Pression hydrostatique)* | **Etat intrinsèque du composant**<br>- Abaissement de la voûte<br>- Fissuration de la voûte<br>- Rupture brutale | - Déformation de la voûte<br>- Fissures évolutives | - Mesures topographiques<br>- Fissuromètres<br>- Observation visuelle |

| N° | Composant | Fonctions de conception | Mode de Défaillance | Cause possible de la défaillance | Effet possible de la défaillance | Symptôme de la défaillance | Moyen de détection |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | **Voûte** | **3. Transmettre les sollicitations des charges :**<br>- Transmettre les sollicitations mécaniques vers les piédroits<br>- *(Transmettre la pression hydrostatique vers le revêtement intérieur en cas de contact avec la nappe phréatique)* | La fonction « transmettre les sollicitations des charges » est dégradée ou est défaillante | **Processus conception-réalisation**<br>- Méthode de construction<br>- Défaut de clavage voûte – piédroit<br><br>**Contact**<br>- Perte de monolithisme originel du tunnel (formation de rotules au niveau des naissances) | **Etat intrinsèque du composant**<br>- Eclatement du revêtement<br><br>**Contact**<br>- Déformation de la section du tunnel<br><br>**Flux de charges**<br>- Modification des contraintes au sein de la maçonnerie | - Décollement d'enduit (ou du carrelage dans les points d'arrêts) au niveau des reins de la voûte<br>- Fissures longitudinales en clé de voûte | - Observation visuelle<br><br>- Fissuromètres<br>- Observation visuelle |
| | | **4. Limiter les flux hydrauliques :**<br>- Limiter les infiltrations (provenant de la voirie, les réseaux divers ou la nappe phréatique) | La fonction « limiter les flux hydrauliques » est dégradée ou est défaillante | **Processus conception-réalisation**<br>- Méthode de construction<br>- Mise en œuvre<br>- Porosité de la maçonnerie<br><br>**Etat intrinsèque du composant**<br>- Fissuration de la maçonnerie<br><br>**Flux hydrauliques**<br>- Eaux d'infiltration (provenant de la voirie, les réseaux divers ou la nappe phréatique)<br><br>**Flux hydromécaniquqes**<br>- Altération physico-chimique de la maçonnerie | **Flux hydrauliques**<br>- Eaux d'infiltration dans le corps de la voûte<br><br>**Flux hydromécaniques**<br>- Erosion de l'interface enduit-maçonnerie | - Traces d'humidité sur l'enduit<br><br>- Constat de vides dans les carottes<br>- Décollement d'enduit (ou du carrelage dans les points d'arrêt) | - Observations visuelles<br><br>- Carottages de reconnaissance<br>- Observations visuelles |

| N° | Composant | Fonctions de conception | Mode de Défaillance | Cause possible de la défaillance | Effet possible de la défaillance | Symptôme de la défaillance | Moyen de détection |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | **Voûte** | **5. Résister aux flux hydromécaniques :**<br>- Résister à l'altération physico-chimique provoquée par les eaux d'infiltration (provenant de la voirie, les réseaux divers ou la nappe phréatique) | La fonction « résister aux flux hydromécaniques » est dégradée ou est défaillante | **Contact**<br>- Vides à l'extrados (intensifiant la circulation d'eau entre le terrain et la maçonnerie)<br><br>**Flux hydrauliques**<br>- Eaux d'infiltration dans le corps de la voûte<br>- Eaux séléniteuses (gypse et marnage) | **Etat intrinsèque du composant**<br>- Altération physico-chimique de la maçonnerie | - Constat de vides et porosité dans les carottes<br>- Chute de matériau | - Carottages de reconnaissance<br>- Observations visuelles |
| 3 | **Piédroits** | **1. Préparer les éléments en contact :**<br>- Assurer l'appui de la voûte<br>- Assurer le contact avec le radier<br>- Préparer la surface de contact des drains<br>- Assurer l'adhérence de l'enduit<br>- Assurer l'appui sur le terrain encaissant<br>- *(Préparer la surface de contact du renforcement en zone de carrières)* | La fonction « préparer les éléments en contact » est dégradée ou est défaillante | **Processus conception-réalisation**<br>- Méthode de construction (liaison entre voûte et piédroit au niveau des naissances)<br>- Mise en œuvre<br><br>**Contact**<br>- Vides à l'extrados par altération physico-chimique de l'encaissant (fontis, dissolution du gypse)<br>- Dégradation des naissances<br>- Défaut de clavage voûte-piédroit<br><br>**Etat intrinsèque du composant**<br>- Fissuration | **Etat intrinsèque du composant**<br>- Rupture brutale<br><br>**Contact**<br>- Perte de monolithisme originel du tunnel (formation de rotules) | - Abaissement de la voûte<br><br>- Déformation de la section du tunnel<br>- Fissures<br>- Décollements d'enduit | - Mesures topographiques<br><br>- Mesures topographiques<br>- Fissuromètre<br>- Observations visuelles |

| N° | Composant | Fonctions de conception | Mode de Défaillance | Cause possible de la défaillance | Effet possible de la défaillance | Symptôme de la défaillance | Moyen de détection |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | **Piédroits** | **2. Résister aux sollicitations des charges :**<br>- Résister aux efforts de l'encaissant<br>- Résister aux efforts transmis par la voûte<br>- *(Résister la pression hydrostatique en cas de contact avec la nappe phréatique)* | La fonction « résister aux sollicitations des charges » est dégradée ou défaillante | **Processus conception-réalisation**<br>- Composition du béton<br>- Mise en œuvre<br><br>**Contact**<br>- Défaut de clavage voûte-piédroit<br><br>**Etat intrinsèque du composant**<br>- Altération physico-chimique du béton<br>- Vieillissement du matériau<br><br>**Flux de charges**<br>- Modification des efforts du terrain encaissant<br>- Etat des contraintes au sein de la maçonnerie<br>- *(Pression hydrostatique)* | **Contact**<br>- Déformation de la section du tunnel<br>- Affaissement de la voûte<br><br>**Flux de charges**<br>- Modification des contraintes au sein des maçonneries<br><br>**Etat intrinsèque du composant**<br>- Fissuration du piédroit<br>- Rupture brutale<br>- Eclatement du revêtement | - Ecartement des piédroits<br>- Abaissement de la voûte<br><br>- Fissures longitudinales en clé de voûte<br>- Décollement d'enduit (ou du carrelage dans les points d'arrêt) au niveau des reins de la voûte<br>- Fissures en piédroit | - Mesures topographiques<br>- Mesures topographiques<br><br>- Fissuromètres<br>- Observations visuelles<br>- Observations visuelles<br><br>- Observations visuelles |
| | | **3. Transmettre les sollicitations des charges :**<br>- Transmettre les sollicitations reçues de la voûte vers le terrain encaissant en assurant le non-poinçonnement du sol<br>- Transmettre les efforts de l'encaissant vers le radier<br>- *(Transmettre les charges de pesanteurs vers le renforcement en zone de carrières)* | La fonction « transmettre les sollicitations des charges » est dégradée ou est défaillante | **Processus conception-réalisation**<br>- Méthode de construction<br><br>**Contact**<br>- Perte de fondation du piédroit<br>- Cohésion du terrain encaissant<br>- Défaut de clavage voûte-maçonnerie<br><br>**Etat intrinsèque du composant**<br>- Déformation | **Contact**<br>- Déformation de la section du tunnel<br><br>**Flux de charges**<br>- Modification des contraintes au sein des maçonneries<br>- Poinçonnement du sol | - Fissures longitudinales en clé de voûte<br><br>- Décollement d'enduit (ou du carrelage dans les points d'arrêt) au niveau des reins de la voûte<br>- Abaissement du piédroit | - Fissuromètres<br>- Observations visuelles<br><br>- Observations visuelles<br><br>- Mesures topographiques |

| N° | Composant | Fonctions de conception | Mode de Défaillance | Cause possible de la défaillance | Effet possible de la défaillance | Symptôme de la défaillance | Moyen de détection |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | **Piédroits** | **4. Limiter les flux hydrauliques :**<br>- Limiter les infiltrations (provenant de la voirie, les réseaux divers ou la nappe phréatique) | La fonction « limiter les flux hydrauliques » est dégradée ou est défaillante | **Processus conception-réalisation**<br>- Méthode de construction<br>- Mise en œuvre<br><br>**Etat intrinsèque du composant**<br>- Fissuration<br>- Porosité<br>- Altération physico-chimique du piédroit<br><br>**Flux hydrauliques**<br>- Eaux d'infiltration (provenant de la voirie, les réseaux divers ou la nappe phréatique)<br><br>**Flux hydromécaniques**<br>- Altération physico-chimique de la maçonnerie | **Flux hydrauliques**<br>- Eaux d'infiltration dans le corps du piédroit<br><br>**Flux hydromécaniques**<br>- Erosion de l'interface enduit-piédroit | - Traces d'humidité sur l'enduit<br><br>- Constat de vides dans les carottes<br>- Décollement d'enduit (ou du carrelage dans les points d'arrêt) | - Observations visuelles<br><br>- Carottages de reconnaissance<br>- Observations visuelles |
| | | **5. Résister aux flux hydromécaniques :**<br>- Résister à l'altération physico-chimique provoquée par les eaux d'infiltration (nappe phréatique, voirie et réseaux divers) | La fonction « résister aux flux hydromécaniques » est dégradée ou est défaillante | **Contact**<br>- Vides à l'extrados<br><br>**Flux hydrauliques**<br>- Eaux d'infiltration dans le corps des piédroits<br>- Eaux séléniteuses (gypse et marnage) | **Etat intrinsèque du composant**<br>- Altération physico-chimique du béton | - Constat de vides et porosité dans les carottes<br>- Chute de matériau | - Carottages de reconnaissance<br><br>- Observations visuelles |

| N° | Composant | Fonctions de conception | Mode de Défaillance | Cause possible de la défaillance | Effet possible de la défaillance | Symptôme de la défaillance | Moyen de détection |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | **Radier** | **1. Préparer les éléments en contact :**<br>- Assurer l'appui sur le terrain encaissant<br>- Assurer le contact avec les piédroits<br>- Préparer la surface de contact des drains<br>- Assurer l'adhérence de l'enduit<br>- Assurer l'appui de la plateforme de roulement<br>- *(Assurer le contact avec le renforcement en présence de carrières)* | La fonction « préparer les éléments en contact » est dégradée ou est défaillante | **Processus conception-réalisation**<br>- Méthode de construction<br>- Mise en œuvre<br><br>**Contact**<br>- Altération physico-chimique du terrain encaissant (dissolution du gypse et formation de fontis<br><br>**Etat intrinsèque du composant**<br>- Déformation | **Contact**<br>- Déformation de la section du tunnel<br>- Perte de fondation du radier<br><br>**Etat intrinsèque du composant**<br>- Perte de monolithisme originel du tunnel<br>- Abaissement du radier<br>- Rupture brutale<br><br>**Flux de charges**<br>- Modification des contraintes au sein de la maçonnerie | - Déplacement des piédroits<br>- Abaissement de la voûte<br><br>- Fissures du radier<br>- Fissures longitudinales en clé de voûte<br>- Décollement d'enduit au niveau des reins de la voûte<br>- Défaut de nivellement de la voie | - Suivi topométrique<br><br>- Suivi topométrique<br><br>- Sondage sous radier<br>- Observations visuelles<br><br>- Observations visuelles<br><br>- Perturbation de la circulation des matériaux roulants |
| | | **2. Résister aux sollicitations des charges :**<br>- Résister aux charges d'exploitation transmises par la plateforme de roulement<br>- Résister aux efforts de l'encaissant transmis par les piédroits<br>- *(Résister la pression hydrostatique en cas de contact avec la nappe phréatique)* | La fonction « résister aux sollicitations des charges » est dégradée ou défaillante | **Processus conception-réalisation**<br>- Méthode de construction<br><br>**Etat intrinsèque du composant**<br>- Altération physico-chimique du radier<br>- Vieillissement du matériau<br><br>**Flux de charges**<br>- Charges d'exploitation<br>- Modification des efforts du terrain encaissant<br>- Etat des contraintes au sein de la maçonnerie<br><br>- *(Pression hydrostatique)* | **Contact**<br>- Déformation de la section du tunnel<br><br>**Etat intrinsèque du composant**<br>- Fissuration du radier<br>- Déformation du radier<br>- Rupture brutale | - Déplacement des piédroits<br>- Abaissement de la voûte<br>- Fissures en clé de voûte<br>- Fissures du radier<br>- Défaut de nivellement de la voie | - Suivi topométrique<br><br>- Suivi topométrique<br><br>- Observations visuelles<br>- Sondage sous radier<br>- Perturbation de la circulation des matériaux roulants |

| N° | Composant | Fonctions de conception | Mode de Défaillance | Cause possible de la défaillance | Effet possible de la défaillance | Symptôme de la défaillance | Moyen de détection |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | **Radier** | **3. Transmettre les sollicitations des charges :**<br>- Transmettre les charges d'exploitation vers le terrain encaissant<br>- *(Transmettre les charges d'exploitation vers le renforcement en présence de carrières)* | La fonction « transmettre les sollicitations des charges » est dégradée ou est défaillante | **Contact**<br>- Vides à l'extrados (perte de fondation du radier)<br>- Cohésion du terrain encaissant | **Etat intrinsèque du composant**<br>- Tassement anormal<br><br>**Flux de charges**<br>- Modification des contraintes au sein de la maçonnerie (apparition de moments fléchissants dans le radier) | - Fissures du radier<br>- Défaut de nivellement de la voie | - Observations visuelles<br>- Perturbation de la circulation des matériaux roulants<br>- Reconnaissances géophysiques non destructives<br>- Sondages de reconnaissance |
| | | **4. Limiter les flux hydrauliques :**<br>- Limiter les infiltrations (provenant de la voirie, les réseaux divers ou la nappe phréatique) | La fonction « limiter les flux hydrauliques » est dégradée ou est défaillante | **Processus conception-réalisation**<br>- Méthode de construction<br>- Mise en œuvre<br><br>**Etat intrinsèque du composant**<br>- Porosité<br>- Fissuration<br><br>**Flux hydrauliques**<br>- Eaux d'infiltration provenant des réseaux divers<br>- *(Nappe phréatique)*<br><br>**Flux hydromécaniques**<br>- Altération physico-chimique de la maçonnerie | **Flux hydrauliques**<br>- Eaux d'infiltration dans le corps du radier | - Taches d'humidité<br>- Apparition d'infiltrations | - Observations visuelles<br>- Observations visuelles |
| | | **5. Résister aux flux hydromécaniques :**<br>- Résister à l'altération physico-chimique provoquée par les eaux d'infiltration (provenant de la voirie, les réseaux divers ou la nappe phréatique) | La fonction « résister aux flux hydromécaniques » est dégradée ou est défaillante | **Flux hydrauliques**<br>- Eaux d'infiltration dans le corps du radier | **Flux hydromécaniques**<br>- Altération physico-chimique du radier | - Constat de vides et porosité dans les carottes | - Carottages de reconnaissance |

| N° | Composant | Fonctions de conception | Mode de Défaillance | Cause possible de la défaillance | Effet possible de la défaillance | Symptôme de la défaillance | Moyen de détection |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | **Drains** | **1. Préparer les éléments en contact :**<br>- Préparer la surface de contact de la voûte<br>- Préparer la surface de contact des piédroits<br>- Préparer la surface de contact du radier<br>- Préparer la surface de contact de l'enduit | La fonction « préparer les éléments en contact » est dégradée ou est défaillante | **Contact**<br>- Déformation du radier<br><br>**Etat intrinsèque du composant**<br>- Fissuration de l'enduit | **Flux hydrauliques**<br>- Eaux d'infiltration dans le corps du revêtement | - Traces d'humidité<br>- Apparition d'infiltrations | - Observations visuelles<br>- Observations visuelles |
| | | **2. Collecter les flux hydrauliques :**<br>- Collecter les eaux d'infiltration | La fonction « collecter les flux hydrauliques » est dégradée ou est défaillante | **Etat intrinsèque du composant**<br>- Colmatage des drains | **Flux hydrauliques**<br>- Eaux d'infiltration dans le corps du revêtement | - Traces d'humidité sur l'enduit<br>- Apparition d'infiltrations | - Observations visuelles<br>- Observations visuelles |
| | | **3. Evacuer les flux hydrauliques :**<br>- Evacuer les eaux collectées vers les puits d'épuisement ou le milieu extérieur | La fonction « évacuer les flux hydrauliques » est dégradée ou est défaillante | **Etat intrinsèque du composant**<br>- Colmatage des drains | **Contact**<br>- Rupture brutale par affaissement du radier<br><br>**Flux hydrauliques**<br>- Eaux d'infiltration dans le corps du revêtement<br>- Inondation du radier<br><br>**Flux hydromécaniques**<br>- Altération physico-chimique du revêtement<br>- Formation de vides à l'extrados par dissolution du gypse | - Traces d'humidité sur l'enduit<br>- Présence d'eau dans la plateforme de roulement<br>- Constat de vides et porosité dans les carottes<br>- Décollement d'enduits<br>- Constat de vides en extrados<br>- Rupture brutale par affaissement du radier | - Observations visuelles<br>- Observations visuelles<br><br>- Carottages de reconnaissance<br><br>- Observations visuelles<br>- Carottages de reconnaissance |

| N° | Composant | Fonctions de conception | Mode de Défaillance | Cause possible de la défaillance | Effet possible de la défaillance | Symptôme de la défaillance | Moyen de détection |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | **Drains** | **4. Résister aux flux hydromécaniques :**<br>- Etre durable face au colmatage dû aux transports de matériaux par les eaux d'infiltration | La fonction « résister aux flux hydromécaniques » est dégradée ou est défaillante | **Etat intrinsèque du composant**<br>- Calcification<br>- Précipitation<br><br>**Flux hydrauliques**<br>- Eaux d'infiltration dans le corps du revêtement<br><br>**Flux hydromécaniques**<br>- Accumulation de particules fines entraînées par la circulation d'eau<br>- Colmatage par le coulis de régénération de maçonnerie | **Etat intrinsèque du composant**<br>- Colmatage des drains<br><br>**Flux hydrauliques**<br>- Eaux d'infiltration dans le corps du revêtement | - Traces d'humidité sur l'enduit<br><br>- Apparition d'infiltrations<br>- Traces d'humidité sur l'enduit | - Observations visuelles<br><br>- Observations visuelles<br>- Observations visuelles |
| 6 | **Enduit** | **1. Préparer les éléments en contact :**<br>- Etre adhérant au revêtement<br>- Préparer la surface de contact des drains<br>- Corriger les défauts visuels | La fonction « préparer les éléments en contact » est dégradée ou est défaillante | **Processus conception-réalisation**<br>- Composition, surdosage de ciment<br>- Mise en œuvre<br><br>**Contact**<br>- Déformation de la section du tunnel<br>- Fissuration du revêtement | **Etat intrinsèque du composant**<br>- Décollement d'enduit<br>- Faïençage<br>- Fissuration | - Chutes d'enduit<br>- Faïençage de l'enduit<br>- Fissures<br>- Sonorité creuse | - Observations visuelles |
| | | **2. Limiter les flux hydrauliques :**<br>- Empêcher l'écoulement des eaux sur les équipements électriques et trottoirs de manœuvre<br>- *(Empêcher l'écoulement des eaux vers le revêtement intérieur)* | La fonction « limiter les flux hydrauliques » est dégradée ou est défaillante | **Etat intrinsèque du composant**<br>- Faïençage<br>- Porosité<br>- Fissuration<br>- Décollement d'enduit<br>- Percement de l'enduit par les régénérations de maçonnerie | **Flux hydrauliques**<br>- Ecoulements d'eau vers l'intérieur du tunnel | - Infiltrations<br>- Concrétions calcaires<br>- Flaques d'eau | - Observations visuelles |

| N° | Composant | Fonctions de conception | Mode de Défaillance | Cause possible de la défaillance | Effet possible de la défaillance | Symptôme de la défaillance | Moyen de détection |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 6 | **Enduit** | **3. Collecter les flux hydrauliques :**<br>- Orienter les eaux d'infiltration vers les drains | La fonction « collecter les flux hydrauliques » est dégradée ou est défaillante | **Etat intrinsèque du composant**<br>- Faïençage<br>- Porosité<br>- Fissuration<br>- Décollement d'enduit<br>- Percement de l'enduit par les régénérations de maçonnerie | **Flux hydrauliques**<br>- Eaux d'infiltration dans le corps de la maçonnerie<br>- Eaux d'infiltration à l'interface enduit-maçonnerie | - Infiltrations<br>- Traces d'humidité | - Observations visuelles |
| | | **4. Résister aux flux hydromécaniques :**<br>- Résister à l'altération physico-chimique provoquée par les eaux d'infiltration (provenant de la voirie, les réseaux divers ou la nappe phréatique) | La fonction « résister aux flux hydromécaniques » est dégradée ou est défaillante | **Processus conception-réalisation**<br>- Composition, surdosage de ciment<br>- Mise en œuvre<br><br>**Flux hydrauliques**<br>- Eaux d'infiltration à l'interface enduit-maçonnerie<br>- *(Défaillance du revêtement intérieur)* | **Etat intrinsèque du composant**<br>- Augmentation de la porosité<br>- Fissuration de l'enduit<br>- Décollement d'enduit<br><br>**Flux hydrauliques**<br>- Apparition d'infiltrations dans l'intérieur du tunnel | - Infiltrations<br>- Fissures<br>- Chutes d'enduit<br><br>- Infiltrations<br>- Concrétions calcaires | - Observations visuelles |
| 7 | ***Revêtement intérieur (en cas de contact avec la nappe phréatique)*** | **1. Préparer les éléments en contact :**<br>- Protéger l'enduit de l'érosion | La fonction « préparer les éléments en contact » est dégradée ou est défaillante | **Etat intrinsèque du composant**<br>- Déformation du composant | **Contact**<br>- Décollement d'enduit<br>- Erosion de l'enduit | - Chutes d'enduit<br>- Infiltrations | - Observations visuelles |
| | | **2. Résister aux sollicitations des charges :**<br>- Renforcer le revêtement pour résister la pression hydrostatique | La fonction « résister aux sollicitations des charges » est dégradée ou défaillante | **Flux de charges**<br>- Pression hydrostatique | **Etat intrinsèque du composant**<br>- Déformation du composant | - Déformation de la section du tunnel<br>- Fissures de l'enduit<br>- Infiltrations | - Mesures topographiques<br>- Observations visuelles |

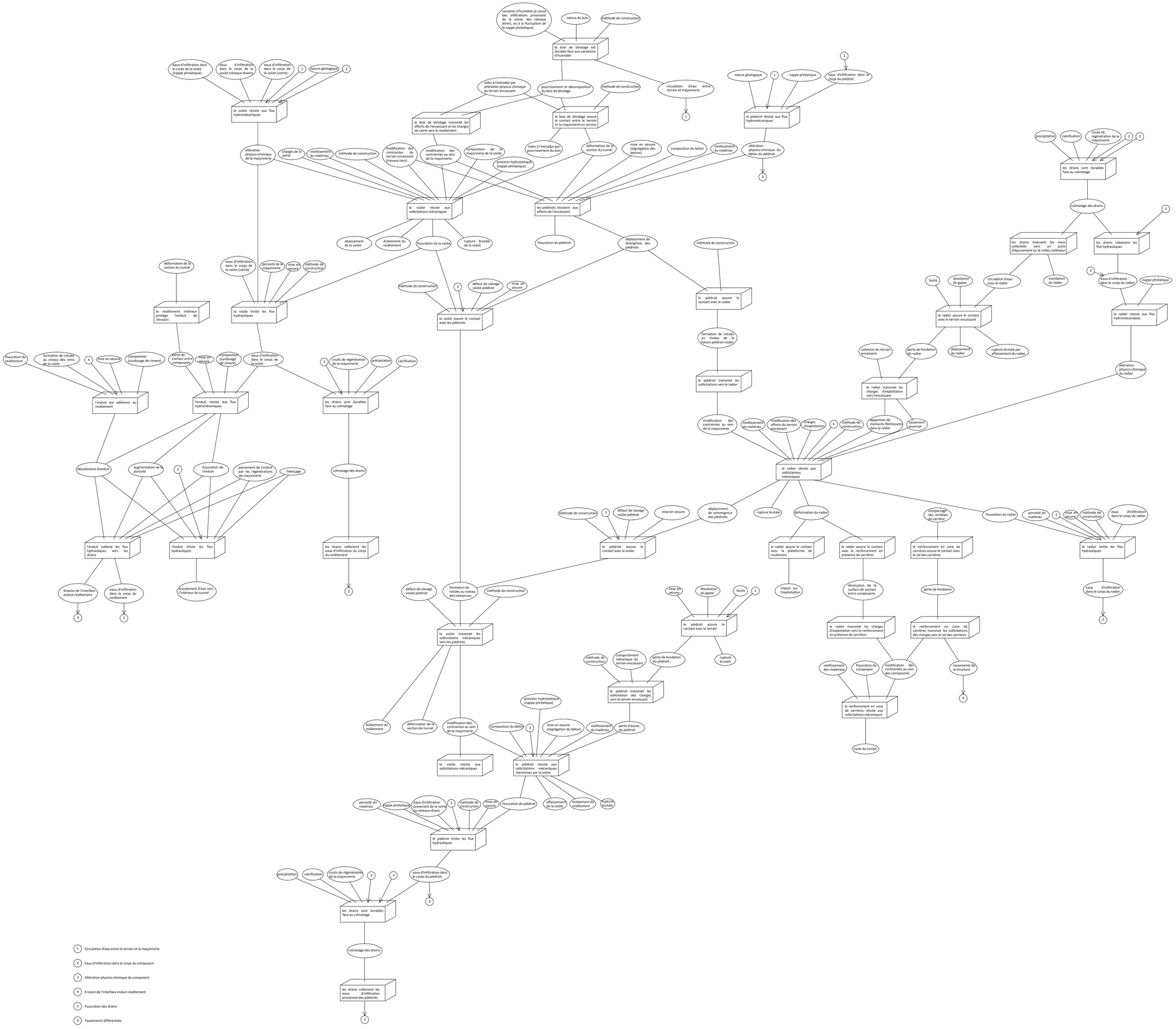
| N° | Composant | Fonctions de conception | Mode de Défaillance | Cause possible de la défaillance | Effet possible de la défaillance | Symptôme de la défaillance | Moyen de détection |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8 | ***(Renforcement en zone de carrières)*** | **1. Préparer les éléments en contact :**<br>- Assurer le contact avec le radier<br>- Assurer le contact avec le sol des carrières | La fonction « préparer les éléments en contact » est dégradée ou est défaillante | **Processus conception réalisation**<br>- Méthode de construction<br>- Mise en œuvre<br><br>**Contact**<br>- Compactage des remblais de carrière<br><br>**Etat intrinsèque du composant**<br>- Déformation | **Contact**<br>- Diminution de la surface de contact entre composants<br><br>**Flux de charges**<br>- Modification des contraintes au sein de la structure<br>- Perte de fondation | - Déformation de la section du tunnel<br>- Fissures<br>- Décollements d'enduit | - Suivi topométrique<br><br>- Observations visuelles |
| | | **2. Résister aux sollicitations des charges :**<br>- Résister aux sollicitations mécaniques transmises par le radier et les piédroits | La fonction « résister aux sollicitations des charges » est dégradée ou défaillante | **Etat intrinsèque du composant**<br>- Fissuration<br>- Vieillissement des matériaux | **Contact**<br>- Déformation de la section du tunnel<br>- Ruine du tunnel | - Fissures évolutives<br>- Désagrégation du matériau<br>- Défaut de nivellement de la voie | - Fissuromètres<br>- Observations visuelles<br>- Suivi topométrique<br>- Perturbation de la circulation des matériaux roulants<br>- Sondages des piliers maçonnés |
| | | **3. Transmettre les sollicitations des charges :**<br>- Transmettre les sollicitations mécaniques vers le sol des carrières | La fonction « transmettre les sollicitations des charges » est dégradée ou est défaillante | **Contact**<br>- Perte de fondation | **Contact**<br>- Tassements de la structure<br><br>**Flux de charges**<br>- Modification des contraintes au sein de la structure du tunnel | - Tassements du radier<br>- Défaut de nivellement de la voie | - Suivi topométrique<br>- Sondages des piliers maçonnés<br>- Carottages de reconnaissance de l'encaissant<br>- Perturbation de la circulation des matériaux roulants |

# Annexe 7. Mécanismes de dégradation des tunnels en maçonnerie

Dans cette annexe, nous présentons, dans un premier temps, le mécanisme de dégradation des tunnels en maçonnerie. Nous identifions ensuite les mécanismes simplifiés qui déclenchent les différents travaux de maintenance. Ces résultats nous permettent d'identifier les paramètres à prendre en compte pour la construction du *critère* « ***performance*** ».

## A7.1 Mécanisme de dégradation des tunnels en maçonnerie

# MECANISME DE DEGRADATION DES TUNNELS MACONNES

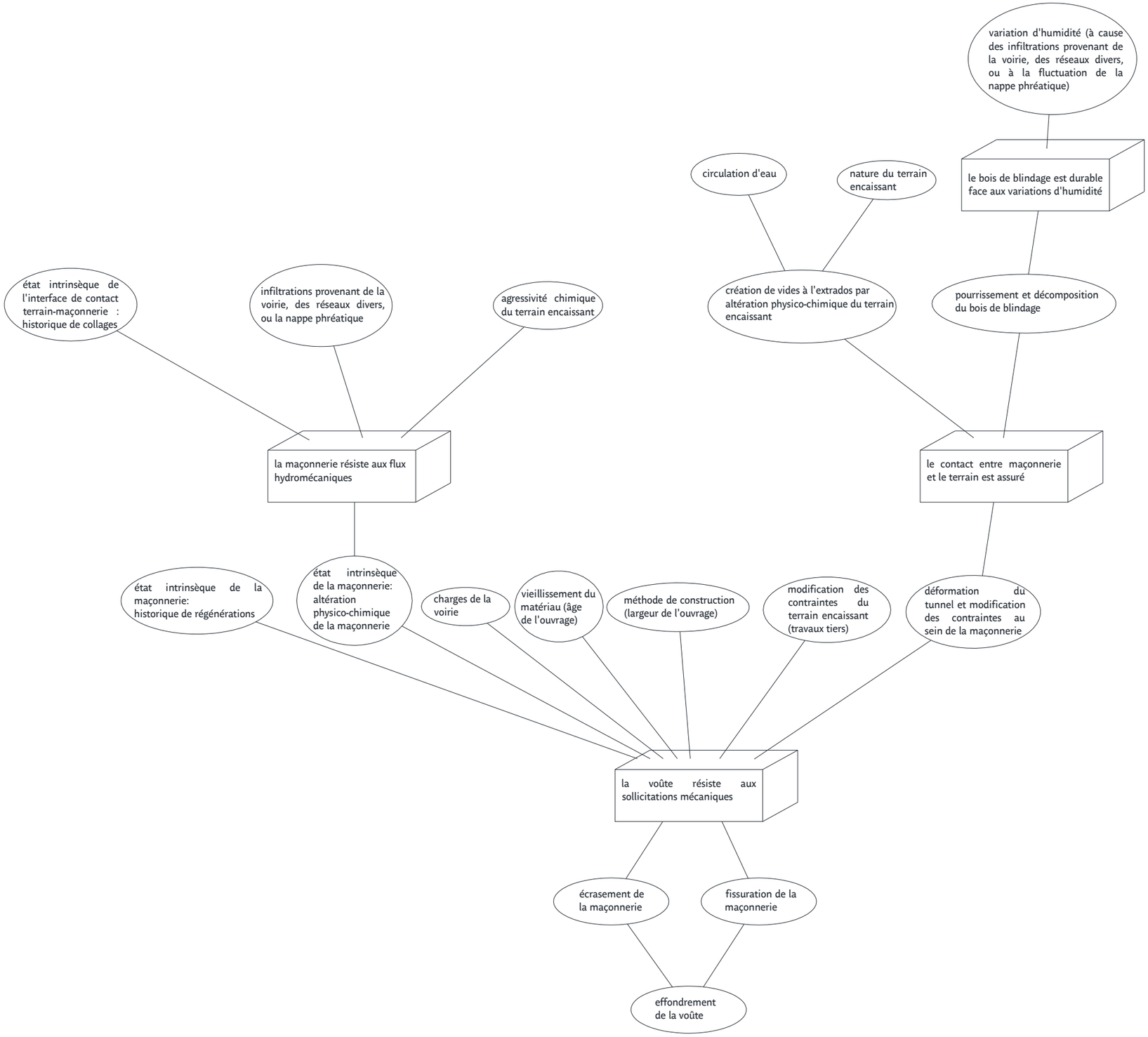


## A7.2 Mécanismes de déclenchement des travaux de maintenance

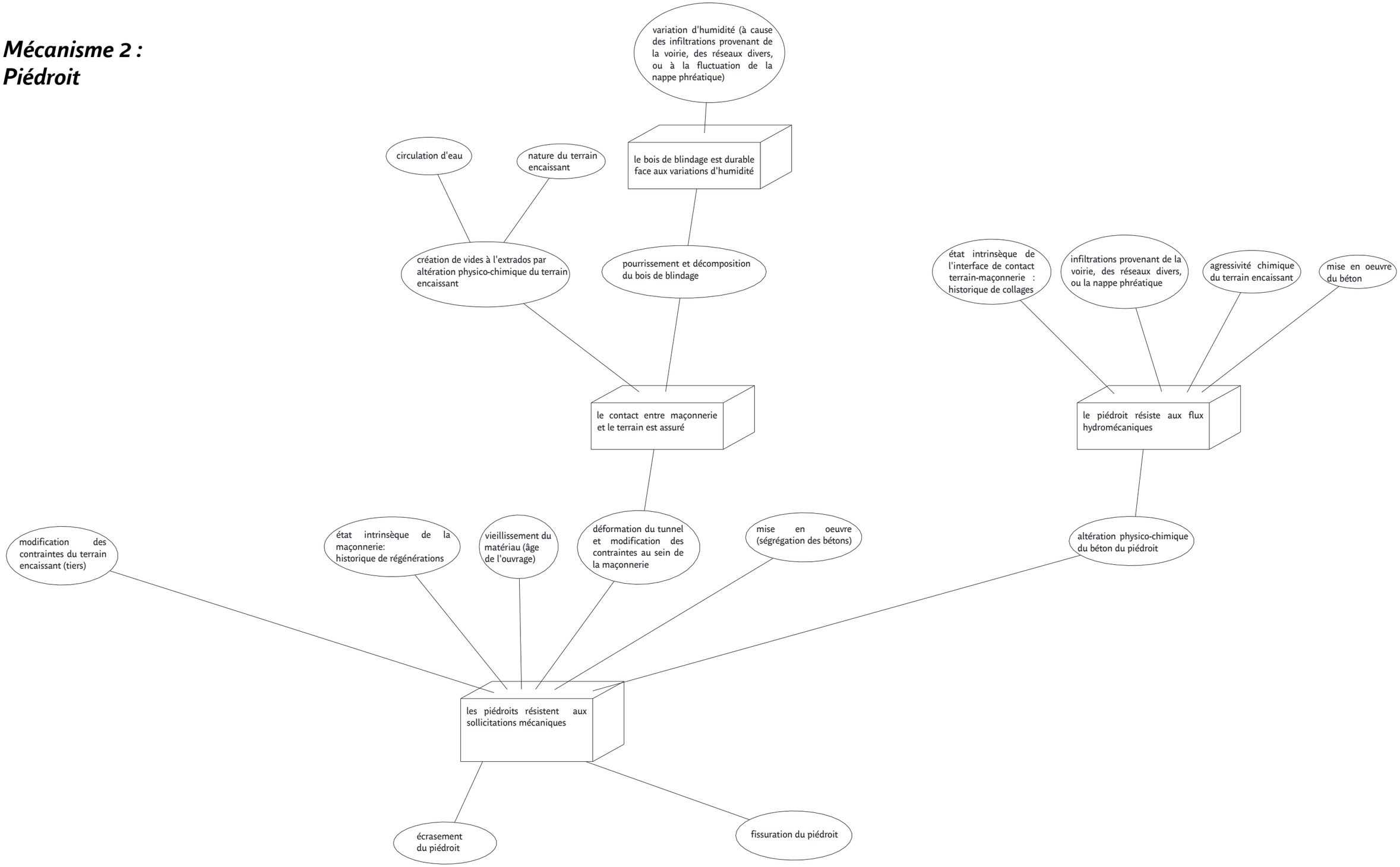
Dans le but de développer un outil d'aide à la décision opérationnel et simple, nous devons adapter les résultats issus du mécanisme de dégradation à l'information dont dispose les gestionnaires de la RATP. Dans ces circonstances, certains phénomènes exigent une information qui n'est pas toujours disponible, ou l'obtention de données trop coûteuses par rapport au bénéfice qu'elles pourraient apporter.

Dans les graphes suivants, nous représentons uniquement les phénomènes dont l'information est exploitable vis-à-vis de la gestion du patrimoine. Ces graphes simplifiés nous permettront d'identifier les paramètres à prendre en compte pour la construction du critère « *performance* ».

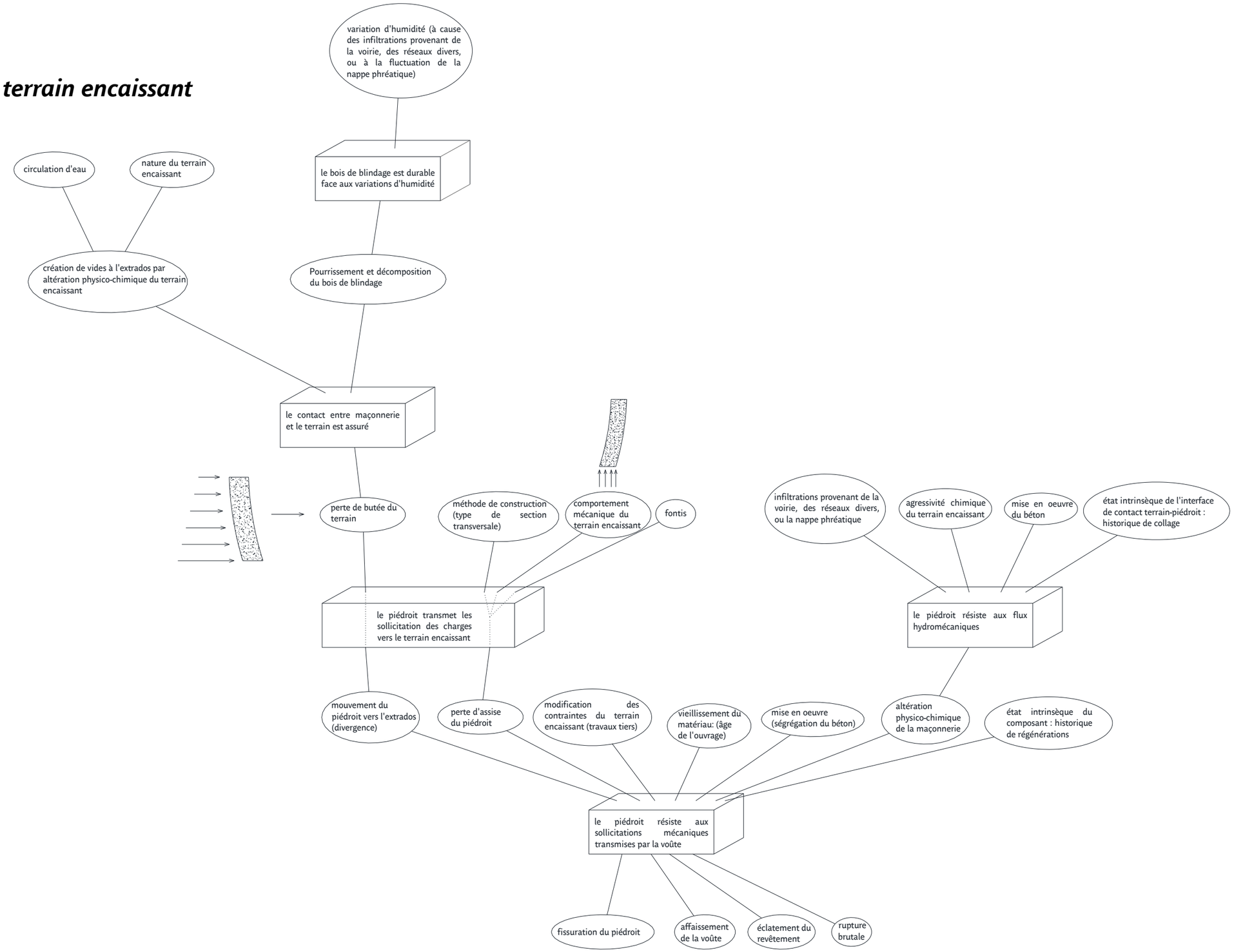
# Mécanisme 1 : Voute



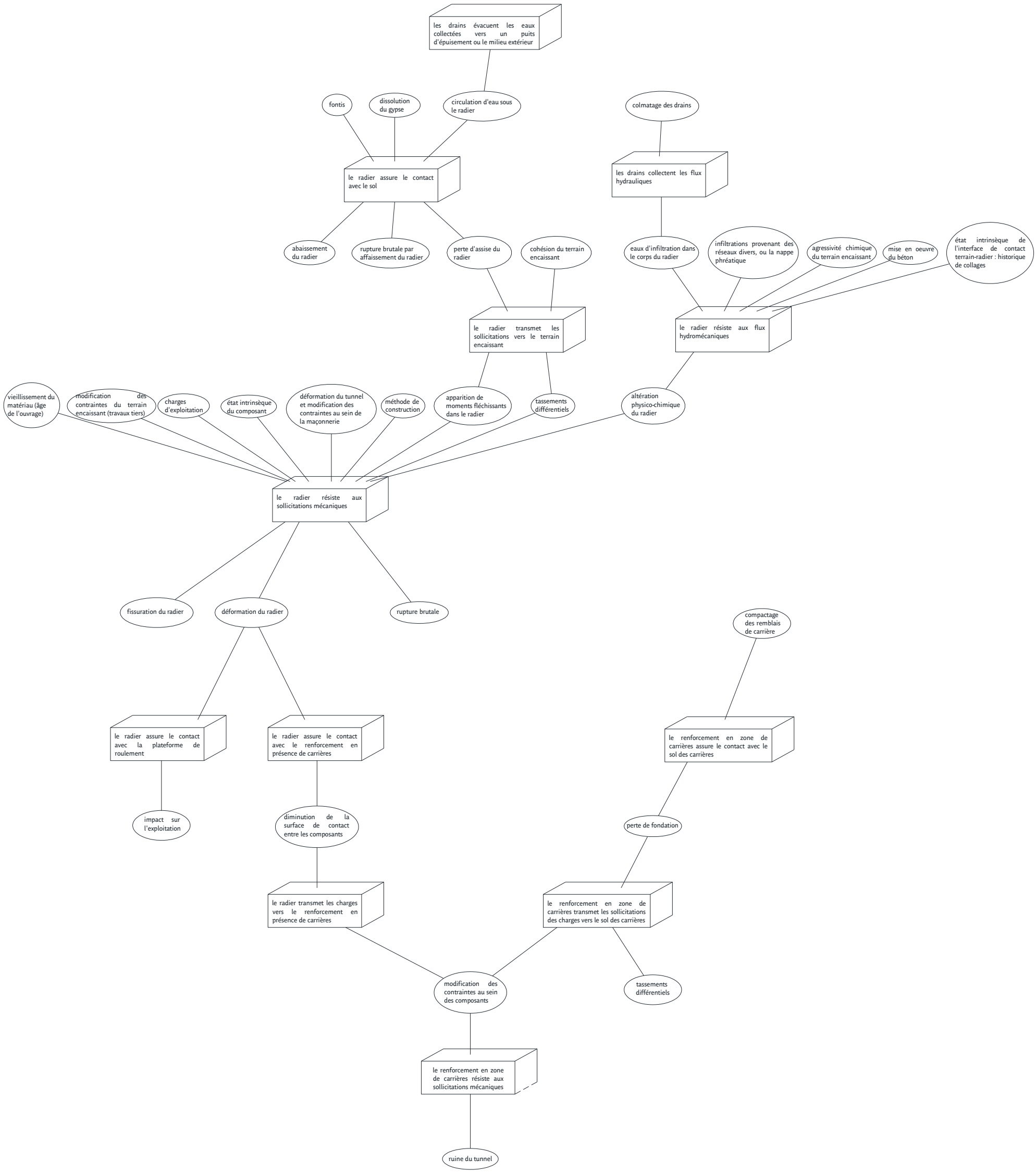
# Mécanisme 2 : Piédroit



# *Mécanisme 3 :*
# *Interaction piédroit – terrain encaissant*



# Mécanisme 4 :
# Interaction radier – terrain



A partir de ces mécanismes, nous identifions une liste des paramètres qui doivent être pris en compte pour la construction du critère de décision « *performance* ». Afin d'assurer l'exhaustivité de cette liste, nous l'avons présentée aux gestionnaires de la RATP pour qu'ils la complètent en intégrant leur expertise.

La configuration définitive est présentée dans le tableau A5-1 :

| Critère | Sous-critère | Paramètre |
|---|---|---|
| **Performance** | **Performance à T$_0$** | Etat de santé (note MARION)<br>• Fissurations<br>• Ecrasement de la voûte au niveau des reins<br>• Infiltrations<br>• Déformation de la section du tunnel |
| | | Age de l'ouvrage |
| | | Historique d'opérations d'entretien<br>• Collage<br>• régénération |
| | **Caractéristiques de l'ouvrage** | Section transversale |
| | | Mise en œuvre |
| | | Largeur de l'ouvrage |
| | **Cinétique** | Evolution constatée dans la notation MARION |
| | | Fréquence des travaux de réhabilitation |
| | **Agressivité de l'environnement** | Risques géotechniques liés aux terrais :<br>• Agressivité chimique du terrain encaissant<br>• Solubilité du terrain<br>• Comportement mécanique du terrain<br>• Perméabilité du terrain<br>• Fontis |
| | | Risques hydrauliques :<br>• Nappe phréatique<br>• Réseaux divers fuyant<br>• Perméabilité de la voirie |

*Tableau A7-1 : Liste de paramètres considérés pour la construction du critère « performance »*

# Annexe 8. Règles d'évaluation des paramètres et agrégation de critères

Cette annexe présente, dans un premier temps, les règles d'évaluation de chacun des paramètres qui interviennent dans la construction de nos critères de décision. Pour ce faire, nous nous basons sur la méthode de règles d'affectation de type « ***si***… ***alors***… » (Azibi, 2003), dont la partie condition (***si***) concerne les évaluations de l'action sur un ensemble d'attributs ou paramètres, et la partie conclusion (***alors***) indique l'affectation à une catégorie de l'échelle d'évaluation.

Dans un second temps, nous présentons les méthodes d'agrégation de chaque critère de décision.

## A8.1 Critère « performance »

La construction du *critère de* « ***performance*** » est réalisée à partir des paramètres suivants (tableau A8-1) :

| Critère | Sous-critère | Paramètre |
|---|---|---|
| **Performance** | **Performance à T.** | Etat de santé (note MARION)<br>• Fissurations<br>• Infiltrations<br>• Déformation de la section du tunnel<br>• Ecrasement de la voûte au niveau des reins |
| | | Age de l'ouvrage |
| | | Historique d'opérations d'entretien<br>• Régénération<br>• Collage<br>• Réfection d'enduit |
| | **Caractéristiques de l'ouvrage** | Largeur de l'ouvrage |
| | **Cinétique** | Evolution constatée dans la notation MARION |
| | | Fréquence des travaux de réhabilitation |
| | **Agressivité de l'environnement** | Risques géotechniques liés aux terrais :<br>• Agressivité chimique du terrain encaissant<br>• Solubilité du terrain<br>• Comportement mécanique du terrain<br>• Perméabilité du terrain<br>• Fontis |
| | | Risques hydrauliques :<br>• Nappe phréatique<br>• Réseaux divers fuyant<br>• Perméabilité de la voirie |

*Tableau A8-1 : Décomposition détaillé du critère « performance » et liste de paramètres considérés*

### A8.1.1 Niveau 1 : évaluation de l'état intrinsèque de l'ouvrage

***Etat de santé (note MARION)***

Les paramètres qui concernent l'état de santé de l'ouvrage sont issus des inspections visuelles et évalués selon la note MARION :

- « *Fissurations* » ;
- « *Infiltrations* » ;
- « *Déformation de la section du tunnel* » ;
- « *Ecrasement de la voûte au niveau des reins* ».

Dans ce cas, nous conservons les règles d'évaluation définies par la méthode de notation MARION. Chaque désordre de l'ouvrage est noté sur une échelle de 1 à 7 (où 1 représente le cas le plus favorable et 7 le plus grave) qui reflète la gravité de ce désordre par rapport à l'état structurel de l'ouvrage (tableau A8-2) :

| Note | Description |
|---|---|
| 1 | **Structure de l'ouvrage en bon état apparent** |
| 2 | **Structure de l'ouvrage en bon état apparent,** mais dont l'entretien courant permettant de le maintenir dans son état de service n'est pas fait |
| 3 | **Structure de l'ouvrage présentant des désordres mineurs,** qui nécessitent un entretien spécialisé sans caractère d'urgence (travaux sur le budget d'exploitation) |
| 4 | **Structure de l'ouvrage présentant des désordres mineurs,** qui doivent être traités rapidement par un entretien spécialisé (travaux sur le budget d'exploitation) **ouvrage dont la structure porteuse altérée,** nécessite des travaux de réparation (travaux sur investissement) à long terme |
| 5 | **Ouvrage dont la structure porteuse est altérée,** nécessite des travaux de réparation à moyen terme |
| 6 | **Ouvrage dont la structure porteuse est altérée**, nécessite des travaux de réparation à court terme :<br>- de l'insuffisance de capacité portante de l'ouvrage ;<br>- du risque d'évolution des désordres à brève échéance ;<br>- de la sécurité des personnes. |
| 7 | **Ouvrage dont la structure porteuse est altérée** rend l'ouvrage impropre à sa destination et pour lequel des restrictions d'utilisation sont définies, voire même une interdiction complète |

*Tableau A8-2 : Evaluation des notes de santé du désordre. (IDSOA, 2008)*

| **Fissurations** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Non | Note MARION du désordre | | | | | | |
| **0** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** |

*Tableau A8-3 : Evaluation du paramètre « fissurations »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage ne présente pas de fissurations ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage présente des fissurations ;
***alors*** l'évaluation est égale à la note MARION.

Pour le paramètre « *infiltrations* », nous avons considéré opportun d'attribuer une valeur de véto dans le cas où ce désordre affecterait la signalisation ou le rail de courant. Nous détaillons l'évaluation de ce paramètre dans le tableau A8-4 :

**Les fissurations présentent des infiltrations ?**

| Non | Infiltration inactive | Infiltration active | | Infiltration affectant le rail de roulement | | Infiltration affectant les quais recevant les voyageurs | Infiltration affectant la signalisation ou le rail de courant |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7 (véto)** |

*Tableau A8-4 : Evaluation du paramètre « infiltrations »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** la fissuration ne présente pas d'infiltration ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0 ;

$r_2$ : ***si*** la fissuration présente une infiltration inactive ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 1 ;

$r_3$ : ***si*** la fissuration présente une infiltration active ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à ;

$r_4$ : ***si*** la fissuration présente une infiltration affectant le rail de roulement ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 4 ;

$r_5$ : ***si*** la fissuration présente une infiltration affectant les quais recevant les voyageurs ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 6 ;

$r_6$ : ***si*** la fissuration présente une infiltration affectant la signalisation ou le rail de courant ;
***alors*** l'évaluation de la « *performance* » est égale à sa valeur maximale (56) (valeur de véto).

**Déformation de la section du tunnel**

| Non | Note MARION du désordre | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** |

*Tableau A8-5 : Evaluation du paramètre « déformation de la section du tunnel »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage ne présente pas de déformation de la section du tunnel ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage présente des déformations de la section du tunnel ;
***alors*** l'évaluation est égale à la note MARION.

**Ecrasement de la voûte au niveau des reins**

| Non | Note MARION du désordre | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** |

*Tableau A8-6 : Evaluation du paramètre « écrasement de la voûte au niveau des reins »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage ne présente pas d'écrasement de la voûte au niveau des reins ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage présente des écrasements de la voûte au niveau des reins ;
***alors*** l'évaluation est égale à la note MARION.

***Age de l'ouvrage***

Les gestionnaires de la RATP considèrent que les ouvrages le plus anciens doivent être prioritaires dans les programmes de maintenance.

Afin de prendre en considération cette priorité des gestionnaires, nous attribuons la note 1, celle qui représente la condition la moins urgente, aux ouvrages les plus récents (moins de 15 ans). En conséquence, la condition la plus urgente, représentée par la note 7, est attribuée aux ouvrages les plus anciens, qui ont plus d'un siècle de vie. Nous proposons de ne pas utiliser l'échelon 6, afin d'accentuer la priorisation des ouvrages âgés de plus de 100 ans vis-à-vis des autres ouvrages, ce qui est en cohérence avec le critère des experts. Les règles d'affectation des autres d'échelons sont précisées dans le tableau A8-7 :

**Age de l'ouvrage (ans)**

| Age de l'ouvrage (ans) | 0 – 14 | 15 - 34 | 35 - 54 | 55 - 74 | 75 - 100 | | > 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Note** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** |

*Tableau A8-7 : Règles d'affectation pour le paramètre « âge de l'ouvrage »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'âge de l'ouvrage est comprise entre 0 et 14 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 1 ;

$r_2$ : ***si*** l'âge de l'ouvrage est comprise entre 15 et 34 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 2 ;

$r_3$ : ***si*** l'âge de l'ouvrage est comprise entre 35 et 54 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 3 ;

$r_4$ : ***si*** l'âge de l'ouvrage est comprise entre 55 et 74 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 4 ;

$r_5$ : ***si*** l'âge de l'ouvrage est comprise entre 75 et 100 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 5 ;

$r_6$ : ***si*** l'âge de l'ouvrage est supérieure à 100 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 7.

Nous rappelons que la période de construction des tunnels maçonnés, selon la méthode franco-belge, est comprise entre les années 1900 et 1960. Pour ces ouvrages, les échelons 1, 2, 3 ne sont pas discriminants en termes de priorisation, tous les ouvrages ayant plus de 54 ans aujourd'hui. Nous considérons cependant convenable de préciser les règles d'affectation de ces notes, afin que notre méthodologie soit facilement extrapolable à tous les types d'ouvrages de la RATP.

Cette proposition de règles nous permet de passer d'une échelle quantitative de l'évaluation du paramètre « *âge de l'ouvrage* » à une échelle en cohérence avec celle de la notation MARION. Mais il faut remarquer qu'une perte d'information s'est produite en adoptant une échelle moins discriminante (uniquement 7 catégories pour évaluer une amplitude d'âges de plus de 100 ans). Néanmoins, les gestionnaires de la RATP ont considéré comme tolérable cette perte d'information et ont validé cette procédure.

***Largeur de l'ouvrage***

La sensibilité des tunnels maçonnés vis-à-vis des fissures et des déformations augmente selon la portée entre piédroits. Dans ce cas, nous considérons que les ouvrages le plus larges doivent être prioritaires par rapport à ceux qui présentent une « largeur type » (tableau A8-8) :

| **Largeur de l'ouvrage** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1-2 voies | 3-4 voies (ou point d'arrêt) | configurations spéciales | | | | |
| **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** |

*Tableau A8-8 : Règles d'affectation pour le paramètre « largeur de l'ouvrage »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage est à 1 ou 2 voies ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 1 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage est à 3 ou 4 voies ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -2 ;

$r_3$ : ***si*** l'ouvrage présente une configuration spéciale ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 3.

### A8.1.2 Niveau 2 : historique d'opérations d'entretien

***Historique d'opérations d'entretien***

On considère que les opérations d'entretien rendent l'ouvrage à son état à neuf. Néanmoins, cette amélioration ne se matérialise pas nécessairement sur l'actuel système de notation MARION (Rysak, 2013). Par exemple, la régénération d'un tunnel fissuré permet de rétablir les propriétés mécaniques et diminue la porosité de la maçonnerie. Par contre, les fissures restent toujours visibles et la surveillance étant visuelle, la note MARION n'est pas améliorée.

Afin d'assurer la cohérence d'une préférence croissante dans toutes les évaluations des paramètres (plus la note est élevée, plus il y a d'intérêt à faire des travaux de réhabilitation), nous considérons que « *l'historique d'opérations d'entretien* » doit aboutir à une note négative ; un ouvrage qui vient d'être réhabilité ne sera logiquement pas prioritaire dans le cadre d'une prochaine programmation de travaux.

Nous considérons qu'une opération d'entretien abaisse à la note 1 (la plus favorable) dans l'évaluation des paramètres des désordres suivants : « *fissurations* » et « *infiltrations* ». C'est-à-dire, elle produit une diminution de la note égale à 2 x (-6). Ainsi, nous attribuons la note -12 aux ouvrages qui ont suivi récemment une régénération de la maçonnerie et/ou une intervention de collage (entre 0 et 14 ans depuis la dernière réhabilitation).

Pour la situation la plus défavorable, les gestionnaires considèrent que la durée de vie d'un ouvrage régénéré est de 70 ans (cette hypothèse est basée sur la durée d'amortissement) ; la note 0 est par conséquent attribuée aux ouvrages qui ont été régénérés il y a plus de 70 ans ou qui n'ont jamais été régénérés. Nous conservons toujours une échelle divisée en 7 échelons avec la distribution de notes définie selon le tableau A8-9 et A8-10.

| **Régénération de la maçonnerie (ans)** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 – 14 | 15 - 29 | 30 - 39 | 40 - 49 | 50 - 59 | 60 - 69 | ≥ 70 |
| **-12** | **-10** | **-8** | **-6** | **-4** | **-2** | **0** |

*Tableau A8-9 : Règles d'affectation pour le paramètre « historique d'opérations d'entretien : régénération »*

| **Collage (ans)** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 – 14 | 15 - 29 | 30 - 39 | 40 - 49 | 50 - 59 | 60 - 69 | ≥ 70 |
| **-12** | **-10** | **-8** | **-6** | **-4** | **-2** | **0** |

*Tableau A8-10 : Règles d'affectation pour le paramètre « historique d'opérations d'entretien : collage »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération de régénération et/ou de collage entre 0 et 14 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -12 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération de régénération et/ou de collage entre 15 et 29 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -10 ;

$r_3$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération de régénération et/ou de collage entre 30 et 39 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -8 ;

$r_4$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération de régénération et/ou de collage entre 40 et 49 ans ;

***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -6 ;

$r_5$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération de régénération et/ou de collage entre 50 et 59 ans ;

***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -4 ;

$r_6$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération de régénération et/ou de collage entre 60 et 69 ans ;

***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -2 ;

$r_7$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération de régénération et/ou de collage il y a 70 ans ou plus, ***et si*** l'ouvrage n'a jamais été régénéré ;

***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0.

Comme pour la régénération de la maçonnerie et le collage, la réfection d'enduit doit présenter une note négative. Dans ce cas, on considère que cette action abaisse à la note 1 l'évaluation du paramètre « *infiltrations* » et on attribue donc la valeur -6 aux ouvrages qui ont suivi récemment une réfection d'enduit. Le reste d'évaluations est attribué de façon linéaire en fonction de la durée d'amortissement, 35 ans pour ce type de travaux. La note 0 est par conséquent attribuée aux ouvrages qui ont suivi une réfection d'enduit il y a plus de 35 ans ou si cette action de maintenance n'a jamais été réalisée.

Nous conservons toujours une échelle divisée en 7 échelons avec la distribution de notes définie selon le tableau A8-11 :

| **Réfection d'enduits (ans)** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 – 5 | 6 - 11 | 12 - 17 | 18 - 23 | 24 - 29 | 30 - 35 | > 35 |
| **-6** | **-5** | **-4** | **-3** | **-2** | **-1** | **0** |

*Tableau A8-11 : Règles d'affectation pour le paramètre « historique d'opérations d'entretien : réfection d'enduits »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une réfection d'enduits entre 0 et 5 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -6 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une réfection d'enduits entre 6 et 11 ans ;

***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -5 ;

$r_3$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une réfection d'enduits entre 12 et 17 ans ;

***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -4 ;

$r_4$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une réfection d'enduits entre 18 et 23 ans ;

***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -3 ;

$r_5$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une réfection d'enduits entre 24 et 29 ans ;

***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -2 ;

$r_6$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une réfection d'enduits entre 30 et 35 ans ;

***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -1 ;

$r_7$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une réfection d'enduits il y a plus de 35 ans, ***et si*** l'enduit n'a jamais été refait ;

***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0.

### A8.1.3 Niveau 3 : évaluation de risques

***Altération physico-chimique de la maçonnerie***

La maçonnerie est sensible aux attaques sulfatiques. Les ouvrages qui sont en contact avec la nappe phréatique ou dans un environnement où le terrain présente des teneurs en sulfate supérieures à 600 mg/l sont particulièrement sensibles à ce phénomène. La situation la plus favorable est celle où l'ouvrage n'a pas de contact avec la nappe phréatique (note 0).

Dans le tableau A8-12, nous présentons les différentes évaluations en fonction de la combinaison de ces deux facteurs : la présence d'eau et l'agressivité chimique du terrain encaissant.

**Altération physico-chimique de la maçonnerie**

| Présence d'eau : nappe phréatique | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Non | Oui : zone d'influence de la Seine | | Oui : hors zone d'influence de la Seine | |
| Agressivité chimique du terrain encaissant | | | | |
| | Zone présentant des teneurs en sulfate inférieures à 600 mg/l | Zone présentant des teneurs en sulfate supérieures à 600 mg/l | Zone présentant des teneurs en sulfate inférieures à 600 mg/l | Zone présentant des teneurs en sulfate supérieures à 600 mg/l |
| **0** | **0** | **3** | **6** | **7** |

*Tableau A8-12 : Règles d'affectation pour le paramètre « agressivité chimique du terrain encaissant »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage n'a pas de contact avec la nappe phréatique ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage est en contact avec la nappe phréatique dans une zone d'influence de la Seine, ***et*** le terrain encaissant présente de teneurs en sulfate inférieures à 600 mg/l ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0 ;

$r_3$ : ***si*** l'ouvrage est en contact avec la nappe phréatique dans une zone d'influence de la Seine, ***et*** le terrain encaissant présente de teneurs en sulfate supérieures à 600 mg/l ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 3 ;

$r_4$ : ***si*** l'ouvrage est en contact avec la nappe phréatique hors une zone d'influence de la Seine, ***et*** le terrain encaissant présente de teneurs en sulfate inférieures à 600 mg/l ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 6 ;

$r_5$ : ***si*** l'ouvrage est en contact avec la nappe phréatique hors une zone d'influence de la Seine, ***et*** le terrain encaissant présente de teneurs en sulfate supérieures à 600 mg/l ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 7.

***Vides à l'extrados par altération physico-chimique du terrain encaissant***

L'altération physico-chimique du terrain encaissant dépend des caractéristiques de la nature géologique de l'encaissant (présence de gypse) et de la présence d'eau.

La dissolution des terrains gypseux peut être déclenchée par les réseaux concessionnaires fuyards ou même par des infiltrations provenant de la voire. Mais la forte densité de ces réseaux dans le sous-sol parisien et la difficulté à obtenir des informations représentatives permettant de déterminer l'origine exacte des infiltrations nous ont fait considérer la présence d'eau uniquement en fonction de la nappe phréatique.

Dans le tableau A8-13 nous proposons une évaluation de ce phénomène en fonction de la solubilité du terrain et la présence de la nappe phréatique.

**Vides à l'extrados par altération physico-chimique du terrain encaissant**

| Solubilité du terrain : présence de gypse | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Non | Calcaire de Saint-Ouen ou Marnes et Caillasses | | Calcaire de Saint-Ouen et Marnes et Caillasses | |
| Présence d'eau : nappe phréatique | | | | |
| | Non | Oui | Non | Oui |
| **0** | **2** | **3** | **6** | **7** |

*Tableau A8-13 : Règles d'affectation pour le phénomène « vides à l'extrados par altération physico-chimique du terrain encaissant » à partir des paramètres de « solubilité du terrain » et « présence d'eau »*

Les règle d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est sont les suivantes :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage est dans un terrain sans présence de gypse ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0 ;

$r_2$ : ***si*** la formation géologique du terrain encaissant est Calcaire de Saint-Ouen ou Marnes et Caillasses, ***et*** l'ouvrage n'est pas en contact avec la nappe phréatique;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 2 ;

$r_3$ : ***si*** la formation géologique du terrain encaissant est Calcaire de Saint-Ouen ou Marnes et Caillasses, ***et*** l'ouvrage est en contact avec la nappe phréatique ; ***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 3 ;

$r_4$ : ***si*** la formation géologique du terrain encaissant est Calcaire de Saint-Ouen et Marnes et Caillasses, ***et*** l'ouvrage n'est pas en contact avec la nappe phréatique;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 6 ;

$r_5$ : ***si*** la formation géologique du terrain encaissant est Calcaire de Saint-Ouen et Marnes et Caillasses, ***et*** l'ouvrage est en contact avec la nappe phréatique ; ***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 7.

***Pourrissement du bois de blindage***

Ce phénomène est produit par la variation d'humidité. On considère qu'un ouvrage qui est complètement immergé dans la nappe phréatique est protégé face à la variation d'humidité car il est « toujours humide ». C'est la situation la plus favorable (note 1). Au contraire, un ouvrage sans contact avec la nappe phréatique présente un risque faible de variation d'humidité par une fuite accidentelle des réseaux concessionnaires, par exemple. La situation la plus défavorable se présente pour les ouvrages qui se trouvent dans une zone de battement de la nappe phréatique (tableau A8-14) :

**Pourrissement du bois de blindage**

| Ouvrage complètement immergé dans la nappe phréatique | Ouvrage sans contact avec la nappe phréatique | Ouvrage dans la zone de battement de la nappe phréatique |
|---|---|---|
| **1** | **3** | **7** |

*Tableau A8-14 : Règles d'affectation pour le phénomène « pourrissement du bois de blindage » en fonction du paramètre « nappe phréatique »*

Les règle d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est sont les suivantes :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage est complétement immergé dans la nappe phréatique ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 1 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage est sans contact avec la nappe phréatique ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 3 ;

$r_3$ : ***si*** l'ouvrage est dans la zone de battement de la nappe phréatique ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 7.

### *A8.1.4 Méthode d'agrégation*

Comme nous l'avons indiqué en § 7.1, nous proposons l'application de l'arbre d'agrégation comme mécanisme de construction du *critère* « ***performance*** ».

Les évaluations précédentes sont agrégées dans une seule note par addition, afin d'obtenir une évaluation de la « ***performance*** ». Cette évaluation est réalisée sur une échelle numérique dont la borne inférieure est définie comme la somme de valeurs inférieures qui peuvent adopter les paramètres (3), et la borne supérieure comme la somme des valeurs supérieures (56).

Finalement, l'évaluation de la « ***performance*** » est obtenue par la somme des notes obtenues précédemment.

## A8.2 Critère « impact de la défaillance »

La construction du *critère* « ***impact de la défaillance*** » est fondée sur le même principe d'arbre d'agrégation utilisé pour le *critère de* « ***performance*** ». Les paramètres considérés sont représentés dans le tableau A8-15 :

| Critère | Paramètre |
|---|---|
| **Impact de la défaillance** | Impact sur l'exploitation<br>• Défaillance affectant l'exploitation<br>• Fréquentation<br>• Correspondance<br>• Périmètre L2-L6 |
| | Image RATP |
| | Impacts externes : répercussions en voirie, environnement politique et social, etc. |

*Tableau A8-15 : Critère « impact de la défaillance » et liste de paramètres considérés*

Les gestionnaires de la RATP considèrent que les ouvrages présentant un impact majeur en cas de défaillance doivent être prioritaires dans la programmation de travaux. Nous respectons ce sens de préférence croissant, dans lequel une note plus élevée représente un intérêt plus grand pour réaliser des travaux de maintenance.

### A8.2.1 Impact sur l'exploitation

Ce sous-critère évalue l'importance stratégique de chaque ouvrage au sein du patrimoine. L'*impact sur l'exploitation* est décomposé dans les paramètres suivants :

- « *Défaillance affectant l'exploitation* » ;
- « *Fréquentation* » ;
- « *Correspondance* » ;
- « *Périmètre L2-L6* ».

***Défaillance affectant l'exploitation***

Ce paramètre vise à évaluer l'impact produit par une défaillance vis-à-vis de l'exploitation (tableau A8-16) :

**Défaillance affectant l'exploitation**

| Défaillance affectant les espaces non visibles par le public | Défaillance affectant les espaces recevant le public | Défaillance affectant la sécurité structurelle | Défaillance perturbant l'exploitation |
|---|---|---|---|
| **1** | **3** | **5** | **7** |

*Tableau A8-16 : Règles d'affectation pour le paramètre « impact sur l'exploitation : défaillance affectant l'exploitation »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** la défaillance affecte les espaces non visibles par le public ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 1 ;

$r_2$ : ***si*** la défaillance affecte les espaces recevant le public ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 3 ;

$r_3$ : ***si*** la défaillance affecte la sécurité structurelle ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 5 ;

$r_4$ : ***si*** la défaillance perturbe l'exploitation ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 7.

***Fréquentation***

Ce paramètre nous permet de considérer l'importance de l'ouvrage en fonction du trafic de voyageurs supporté par la ligne à laquelle il appartient. Dans ce cas, les lignes les plus sollicitées doivent être prioritaires (tableau A8-17) :

**Fréquentation**

| 0 – 150 000 voyageurs/jour (lignes 3b et 7b) | 150 000 – 300 000 voyageurs/jour (lignes 10 et 11) | 300 000 – 450 000 voyageurs/jour (lignes 12 et 14) | 450 000 – 600 000 voyageurs/jour (lignes 2, 5, 6, 7, 8 et 9) | 600 000 – 750 000 voyageurs/jour (lignes 1, 4 et 13) | 750 000 – 900 000 voyageurs/jour | > 900 000 voyageurs/jour (RER A et B) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** |

*Tableau A8-17 : Règles d'affectation pour le paramètre « impact sur l'exploitation : fréquentation »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage appartient à une ligne supportant un trafic de moins de 150 000 voyageurs par jours ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 1 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage appartient à une ligne supportant un trafic entre 150 000 et 300 000 voyageurs par jours ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 2 ;

$r_3$ : ***si*** l'ouvrage appartient à une ligne supportant un trafic entre 300 000 et 450 000 voyageurs par jours ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 3 ;

$r_4$ : ***si*** l'ouvrage appartient à une ligne supportant un trafic entre 450 000 et 600 000 voyageurs par jours ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 4 ;

$r_5$ : ***si*** l'ouvrage appartient à une ligne supportant un trafic entre 600 000 et 750 000 voyageurs par jours ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 5 ;

$r_6$ : ***si*** l'ouvrage appartient à une ligne supportant un trafic entre 750 000 et 900 000 voyageurs par jours ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 6 ;

$r_7$ : ***si*** l'ouvrage appartient à une ligne supportant un trafic de plus de 900 000 voyageurs par jours ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 7.

***Correspondance***

La défaillance d'un ouvrage de correspondance peut provoquer des répercussions sur le fonctionnement de plusieurs lignes et même à l'échelle du réseau. Ce paramètre nous permet d'évaluer l'impact de la défaillance d'un ouvrage en fonction des correspondances avec les différentes lignes de métro et RER. Le tableau A8-18 représente l'attribution de notes proposée pour les points d'arrêt :

| **Correspondance** | | |
|---|---|---|
| Point d'arrêt sans correspondances | Point d'arrêt en correspondance avec les lignes de métro ou de RER | Point d'arrêt en correspondance avec les lignes de métro et RER |
| **0** | **1** | **2** |

*Tableau A8-18 : Règles d'affectation pour le paramètre « impact sur l'exploitation : fréquentation »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** le point d'arrêt n'a pas de correspondances ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0 ;

$r_2$ : ***si*** le point d'arrêt est en correspondance avec les lignes de métro ou RER ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 1 ;

$r_3$ : ***si*** le point d'arrêt est en correspondance avec les lignes de métro et RER ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 2.

Pour évaluer les interstations selon ce paramètre, nous proposons de retenir la moyenne des notes attribuées aux points d'arrêt qui les entourent.

***Périmètre L2 – L6***

Les lignes 2 et 6 du métro forment un périmètre à l'intérieur duquel la densité du maillage du réseau de la RATP permet de trouver facilement un chemin alternatif par l'emprunt d'autres lignes dont les correspondances sont assez proches entre elles. Ce n'est plus le cas des ouvrages qui s'y trouvent à l'extérieur, car lorsque le service y est interrompu, la gêne occasionnée pour les voyageurs est alors plus importante. Lorsque le service est interrompu sur un territoire situé à l'extérieur de ce périmètre, la RATP doit systématiquement mettre en place des services de substitution appropriés pendant la durée de l'interruption. A l'intérieur de ce périmètre, le service de substitution est mis en place en fonction des besoins (STIF, 2012). Ce paramètre prend en compte cette différence, en priorisant les ouvrages qui sont à l'extérieur du périmètre formé par les lignes 2 et 6 à ceux situés à l'intérieur (tableau A8-19) :

**Périmètre L2 – L6**

| Ouvrage situé dans le périmètre L2 – L6 | Ouvrage situé en dehors du périmètre L2 – L6 |
|---|---|
| **0** | **3** |

*Tableau A8-19 : Règles d'affectation pour le paramètre « impact sur l'exploitation périmètre L2 –L6 »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage est situé dans le périmètre L2 – L6 ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage est situé en dehors du périmètre L2 – L6 ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 3.

### *A8.2.2 Image RATP*

Certaines lignes symbolisent le développement technique de la RATP, comme c'est le cas pour les lignes automatiques. Elles ont un effet « vitrine » qu'il est important de conserver. Ce critère permet d'augmenter la priorité de ces lignes « vitrine » (tableau A8-20) :

| **Image RATP** | |
|---|---|
| Lignes sans effet « vitrine »<br>Lignes 2, 3, 3b, 5, 6, 7, 7b, 8, 9, 10, 11, 12 et 13 | Lignes « vitrine »<br>Ligne 1, Ligne 4 et Ligne 14 |
| **0** | **3** |

*Tableau A8-20 : Règles d'affectation pour le paramètre « impact sur l'exploitation : fréquentation »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage appartient aux lignes 2, 3, 3b, 5, 6, 7, 7b, 8, 9, 10, 11, 12 ou ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage appartient aux lignes 1, 4 ou 14 ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 3.

### *A8.2.3 Impacts externes*

Les impacts des défaillances peuvent dépasser largement le périmètre immédiat de l'infrastructure. Ces impacts externes sont difficiles à mesurer, à cause des multiples interactions existant entre un réseau de transport et un environnement urbain très dense, comme c'est le cas de la RATP et de la région parisienne.

Des paramètres plus fins pourraient être pris en compte : l'intérêt touristique, l'importance socio-économique de l'ouvrage, la densité de population de la zone desservie, etc. Mais ces informations ne sont disponibles que pour des cas très ponctuels, et leur acquisition, à l'échelle globale du patrimoine, serait trop laborieuse par rapport au bénéfice qu'elles pourraient apporter au processus de décision.

Dans ces circonstances, nous proposons que ce paramètre soit soumis à la perception subjective des gestionnaires, à juger au cas par cas en fonction du contexte temporel et géographique des ouvrages : répercussions en voirie, sur les réseaux concessionnaires, environnement politique et social, etc.

| **Impacts externes** | | |
|---|---|---|
| Impacts externes faibles | Impacts externes moyens | Impacts externes importants |
| **0** | **+1** | **+2** |

*Tableau A8-21 : Règles d'affectation pour le paramètre « impacts externes »*

L'évaluation de ce paramètre est réalisée en fonction de la perception subjective des gestionnaires.

### *A8.2.4 Méthode d'agrégation*

Comme pour le *critère* « ***performance*** », nous proposons d'agréger les évaluations précédentes pour obtenir une évaluation du *critère* « ***impact de la défaillance*** ». Afin d'évaluer ce critère sur une échelle en cohérence avec celle de MARION, nous proposons d'additionner les notes de chaque paramètre et attribuer un score de 1 à 7 en fonction de la grille suivante (tableau A8-22):

| Somme des évaluations des paramètres | 2 – 5 | 6 – 8 | 9 – 11 | 12 – 14 | 15 – 17 | 18 – 20 | 21 - 22 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Note du critère** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** |

*Tableau A8-22 : Grille d'évaluation du critère « impact de la défaillance »*

## A8.3 Critère « opportunité de travaux »

La coordination des travaux de maintenance avec d'autres chantiers peut produire des économies et une diminution des impacts (Duarte, 2012). Ce critère permet de prendre en compte les opportunités de travaux qui peuvent se produire en fonction des interactions entre la programmation des travaux de maintenance et ceux de différentes natures.

La construction de ce critère est réalisée à partir des paramètres suivants (tableau A8-23) :

| Critère | Paramètre |
|---|---|
| **Opportunité de travaux** | Politique de rénovation de la RATP |
| | Travaux externes |

*Tableau A8-23 : Critère « opportunité de travaux » et liste de paramètres considérés*

### A8.3.1 Politique de rénovation de la RATP

Ce paramètre tient compte des opportunités qui peuvent être occasionnées par la programmation de travaux au sein de la RATP par la RATP, qui sont d'une nature différente aux campagnes de maintenance (tableau A8-24) :

| Politique de rénovation interne RATP | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Ouvrages non concernés par la politique de rénovation de la RATP | Ouvrages concernés par le programme de renouvellement des stations du métro (RNM) au-delà de 3 ans | Ouvrages concernés par le programme RNM dans 3 ans | Ouvrages concernés par l'automatisation de lignes | Ouvrages concernés par le programme RNM avant de 2 ans |
| **1** | **4** | **5** | **6** | **7** |

*Tableau A8-24 : Règles d'affectation pour le paramètre « politique de rénovation interne RATP »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage n'est concerné pas concerné par la politique de rénovation de la RATP ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 1 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage est concerné par le programme RNM dans 3 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 4 ;

$r_3$ : ***si*** l'ouvrage est concerné par le programme RNM dans 3 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 5 ;

$r_4$ : ***si*** l'ouvrage est concerné par l'automatisation de lignes ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 6 ;

$r_5$ : ***si*** l'ouvrage est concerné par le programme RNM avant de 2 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 7.

### *A8.3.2 Travaux externes*

Les mécanismes de dégradation des tunnels maçonnés (Annexe 7) montrent que les travaux tiers réalisés à proximité des tunnels peuvent avoir une influence sur la stabilité des ouvrages. Dans ces cas, il peut être judicieux (et parfois nécessaire) de renforcer les ouvrages et de programmer des actions de maintenance avant la réalisation de ce type de travaux externes.

Nous proposons, pour ce paramètre, la règle suivante (tableau A8-25) :

| **Travaux externes** | |
|---|---|
| Ouvrage non affecté par les travaux externes | Ouvrage affecté par les travaux externes |
| **1** | **7** |

*Tableau A8-25 : Règles d'affectation pour le paramètre « politique de rénovation interne RATP »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage n'est pas concerné par les travaux externes ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage est concerné par les travaux externes ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 7.

### *A8.3.3 Méthode d'agrégation*

Nous proposons de retenir la note la plus élevé des paramètres précédents. De cette façon, nous obtenons une évaluation du *critère* « ***opportunité de travaux*** » sur une échelle de 1 à 7, en cohérence avec celle de MARION.

## A8.4 Critère « groupement de travaux »

Ce critère vise à éviter la dispersion géographique des chantiers de maintenance dans la définition des travaux de réhabilitation. Il est décomposé dans les paramètres suivants :

| Critère | Paramètre |
|---|---|
| **Groupement de travaux** | Travaux connexes |
| | Travaux internes |

*Tableau A8-26 : Critère « groupement de travaux » et liste de paramètres considérés*

### A8.4.1 Travaux connexes

L'objectif de ce paramètre est de prioriser et programmer les travaux de réhabilitation ayant une proximité géographique. Nous proposons l'évaluation de ce paramètre selon le tableau A8-27 :

| **Travaux connexes** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Ouvrage à côté d'un ouvrage classé en CAT 3 lors de l'étape 1 de l'outil d'aide à la décision | Ouvrage à côté d'un ouvrage classé en CAT 4 lors de l'étape 1 de l'outil d'aide à la décision | Ouvrage entre deux ouvrages classés en CAT 3 lors de l'étape 1 de l'outil d'aide à la décision | Ouvrage placé entre deux ouvrages classés en CAT 3 et 4 lors de l'étape 1 de l'outil d'aide à la décision | Ouvrage placé entre deux ouvrages classés en CAT 4 lors de l'étape 1 de l'outil d'aide à la décision |
| **1** | **2** | **2** | **3** | **4** |

*Tableau A8-27 : Règles d'affectation pour le paramètre « travaux connexes »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage est à côté d'un ouvrage classé en CAT 3 lors de l'étape 1 de l'outil d'aide à la décision ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 1 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage est à côté d'un ouvrage classé en CAT 4 lors de l'étape 1 de l'outil d'aide à la décision ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 2 ;

$r_3$ : ***si*** l'ouvrage est entre deux ouvrages classés en CAT 3 lors de l'étape 1 de l'outil d'aide à la décision ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 2 ;

$r_4$ : ***si*** l'ouvrage est entre deux ouvrages classés en CAT 3 et CAT 4 lors de l'étape 1 de l'outil d'aide à la décision ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 3 ;

$r_5$ : ***si*** l'ouvrage est entre deux ouvrages classés en CAT 4 lors de l'étape 1 de l'outil d'aide à la décision ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 4.

### *A8.4.2 Travaux internes*

Certains ouvrages sont concernés par des PGE proposant plusieurs types de travaux sur le même ouvrage (principalement régénération, collage et réfection d'enduits). Ce paramètre permet de prioriser ce type de PGE, afin que l'ensemble des travaux proposés soient programmés conjointement (tableau A8-28) :

| **Travaux internes** | |
|---|---|
| PGE proposant un seul type de travaux | PGE proposant plus d'un type de travaux |
| **0** | **7** |

*Tableau A8-28 : Règles d'affectation pour le paramètre « travaux connexes »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage est concerné par une PGE proposant un seul type de travaux ; ***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage est concerné par une PGE proposant un seul type de travaux ; ***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 7.

### *A8.4.3 Méthode d'agrégation*

Nous proposons de retenir la note moyenne résultant des évaluations des paramètres précédents. De cette façon, nous obtenons une évaluation du *critère* « ***groupement de travaux*** » sur une échelle de 1 à 5,5.

## A8.5 Synthèse

Dans cette annexe nous avons présenté les règles d'affection des paramètres et d'agrégation pour la construction de critères. Le tableau A8-29 synthétise les caractéristiques des critères obtenus, sur lesquels se base notre outil d'aide à la décision

| Critère | Type | Echelle d'évaluation |
|---|---|---|
| Performance | pseudo critère | qualitative ordinale (3 – 56) |
| Impact de la défaillance | vrai critère | qualitative ordinale (1 – 7) |
| Opportunité de travaux | vrai critère | qualitative ordinale (1 – 7) |
| Groupement de travaux | vrai critère | qualitative ordinale (1 – 5,5) |

*Tableau A8-29 : Caractéristiques des critères de décision*

# Annexe 9. Exemple d'évaluation des actions

Dans cette annexe, nous présentons l'exemple de l'action « *Gare de l'Est, tunnel TU030, régénération de la maçonnerie* » (ligne 4) pour illustrer la méthodologie d'évaluation des actions selon les critères définis dans l'Annexe 1.

Dans les différents tableaux ci-dessous, nous représentons par un cadre rouge les différentes évaluations qui correspondent à ce cas d'étude.

## A9.1 Critère « performance »

La construction du *critère de* « ***performance*** » est réalisée à partir des paramètres représentés dans le tableau A9-1.

| Critère | Sous-critère | Paramètre | Ouvrage : Gare de l'Est, TU030 |
|---|---|---|---|
| **Performance** | **Performance à T.** | Etat de santé (note MARION)<br>• Fissurations<br>• Infiltrations<br>• Déformation de la section du tunnel<br>• Ecrasement de la voûte au niveau des reins | • 3 (note max de ce type de désordre)<br>• Infiltrations actives<br>• Désordre non constaté<br>• Désordre non constaté |
| | | Age de l'ouvrage | 107 ans (date de construction 1908) |
| | | Historique d'opérations d'entretien<br>• Régénération<br>• Collage<br>• Réfection d'enduit | • 1975 (40 ans)<br>• Non réalisé<br>• Non réalisé |
| | **Caractéristiques de l'ouvrage** | Largeur de l'ouvrage | Point d'arrêt : 2 voies et 2 quais |
| | **Cinétique** | Evolution constatée dans la notation MARION | Non |
| | | Fréquence des travaux de réhabilitation | Non |
| | **Agressivité de l'environnement** | Risques géotechniques liés aux terrains :<br>• Agressivité chimique du terrain encaissant<br>• Solubilité du terrain | • zone présentant des teneurs en sulfate inférieures à 600 mg/l<br>• zone de calcaire de Saint-Ouen et Marnes et Caillasses |
| | | Risques hydrauliques :<br>• Nappe phréatique | Risques hydrauliques :<br>• Hors nappe phréatique |

*Tableau A9-1 : Critère de « performance » : caractéristiques de l'ouvrage « Gare de l'Est, TU030 »*

### A9.1.1 Niveau 1 : évaluation de l'état intrinsèque de l'ouvrage

#### Etat de santé (note MARION)

| Fissurations | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Note MARION du désordre | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |

*Tableau A9-2 : Evaluation du paramètre « fissurations »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage ne présente pas de fissurations ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage présente des fissurations ;
***alors*** l'évaluation est égale à la note MARION.

| Les fissurations présentent des infiltrations ? | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Non | Infiltration inactive | Infiltration active | | Infiltration affectant le rail de roulement | | Infiltration affectant les quais recevant les voyageurs | Infiltration affectant la signalisation ou le rail de courant |
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 (véto) |

*Tableau A9-3 : Evaluation du paramètre « infiltrations »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** la fissuration ne présente pas d'infiltration ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0 ;

$r_2$ : ***si*** la fissuration présente une infiltration inactive ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 1 ;

$r_3$ : ***si*** la fissuration présente une infiltration active ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 2 ;

$r_4$ : ***si*** la fissuration présente une infiltration affectant le rail de roulement ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 4 ;

$r_5$ : ***si*** la fissuration présente une infiltration affectant les quais recevant les voyageurs ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 6 ;

$r_6$ : ***si*** la fissuration présente une infiltration affectant la signalisation ou le rail de courant ;
***alors*** l'évaluation de la « *performance* » est égale à sa valeur maximale (56) (valeur de véto).

**Déformation de la section du tunnel**

| Non | Note MARION du désordre | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** |

*Tableau A9-4 : Evaluation du paramètre « déformation de la section du tunnel »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage ne présente pas de déformation de la section du tunnel ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage présente des déformations de la section du tunnel ;
***alors*** l'évaluation est égale à la note MARION.

**Ecrasement de la voûte au niveau des reins**

| Non | Note MARION du désordre | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** |

*Tableau A9-5 : Evaluation du paramètre « écrasement de la voûte au niveau des reins »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage ne présente pas d'écrasement de la voûte au niveau des reins ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage présente des écrasements de la voûte au niveau des reins ;
***alors*** l'évaluation est égale à la note MARION.

### *Age de l'ouvrage*

**Age de l'ouvrage (ans)**

| Age de l'ouvrage (ans) | 0 – 14 | 15 - 34 | 35 - 54 | 55 - 74 | 75 - 100 | | > 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Note** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** |

*Tableau A9-6 : Règles d'affectation pour le paramètre « âge de l'ouvrage »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'âge de l'ouvrage est comprise entre 0 et 14 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 1 ;

$r_2$ : ***si*** l'âge de l'ouvrage est comprise entre 15 et 34 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 2 ;

$r_3$ : ***si*** l'âge de l'ouvrage est comprise entre 35 et 54 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 3 ;

$r_4$ : ***si*** l'âge de l'ouvrage est comprise entre 55 et 74 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 4 ;

$r_5$ : ***si*** l'âge de l'ouvrage est comprise entre 75 et 100 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 5 ;

$r_6$ : ***si*** l'âge de l'ouvrage est supérieure à 100 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 7.

### *Largeur de l'ouvrage*

**Largeur de l'ouvrage**

| 1-2 voies | 3-4 voies (ou point d'arrêt) | configurations spéciales | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** |

*Tableau A9-7 : Règles d'affectation pour le paramètre « largeur de l'ouvrage »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage est à 1 ou 2 voies ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 1 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage est à 3 ou 4 voies ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 2 ;

$r_3$ : ***si*** l'ouvrage présente une configuration spéciale ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 3.

### A9.1.2 Niveau 2 : historique d'opérations d'entretien

#### Historique d'opérations d'entretien

| Régénération de la maçonnerie (ans) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 – 14 | 15 - 29 | 30 - 39 | 40 - 49 | 50 - 59 | 60 - 69 | ≥ 70 |
| **-12** | **-10** | **-8** | **-6** | **-4** | **-2** | **0** |

*Tableau A9-8 : Règles d'affectation pour le paramètre « historique d'opérations d'entretien : régénération »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération de régénération entre 0 et 14 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -12 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération de régénération entre 15 et 29 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -10 ;

$r_3$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération de régénération entre 30 et 39 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -8 ;

$r_4$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération de régénération entre 40 et 49 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -6 ;

$r_5$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération de régénération entre 50 et 59 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -4 ;

$r_6$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération de régénération entre 60 et 69 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -2 ;

$r_7$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération de régénération il y a 70 ans ou plus, ***ou si*** l'ouvrage n'a jamais été régénéré ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0.

| Collage (ans) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 – 14 | 15 - 29 | 30 - 39 | 40 - 49 | 50 - 59 | 60 - 69 | ≥ 70 |
| **-12** | **-10** | **-8** | **-6** | **-4** | **-2** | **0** |

*Tableau A9-9 : Règles d'affectation pour le paramètre « historique d'opérations d'entretien : collage »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération de collage entre 0 et 14 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -12 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération de collage entre 15 et 29 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -10 ;

$r_3$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération de collage entre 30 et 39 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -8 ;

$r_4$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération de collage entre 40 et 49 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -6 ;

$r_5$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération collage entre 50 et 59 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -4 ;

$r_6$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération de collage entre 60 et 69 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -2 ;

$r_7$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une opération de collage il y a 70 ans ou plus, ***et si*** l'ouvrage n'a jamais été régénéré ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0.

| Réfection d'enduits (ans) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 – 5 | 6 - 11 | 12 - 17 | 18 - 23 | 24 - 29 | 30 - 35 | > 35 |
| **-6** | **-5** | **-4** | **-3** | **-2** | **-1** | **0** |

*Tableau A9-10 : Règles d'affectation pour le paramètre « historique d'opérations d'entretien : réfection d'enduits »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une réfection d'enduits entre 0 et 5 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -6 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une réfection d'enduits entre 6 et 11 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -5 ;

$r_3$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une réfection d'enduits entre 12 et 17 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -4 ;

$r_4$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une réfection d'enduits entre 18 et 23 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -3 ;

$r_5$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une réfection d'enduits entre 24 et 29 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -2 ;

$r_6$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une réfection d'enduits entre 30 et 35 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à -1 ;

$r_7$ : ***si*** l'ouvrage a fait l'objet d'une réfection d'enduits il y a plus de 35 ans, ***et si*** l'ouvrage n'a jamais été régénéré ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0.

### A9.1.3 Niveau 3 : évaluation de risques

| Altération physico-chimique de la maçonnerie | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Présence d'eau : nappe phréatique | | | | |
| Non | Oui : zone d'influence de la Seine | | Oui : hors zone d'influence de la Seine | |
| Agressivité chimique du terrain encaissant | | | | |
| | Zone présentant des teneurs en sulfate inférieures à 600 mg/l | Zone présentant des teneurs en sulfate supérieures à 600 mg/l | Zone présentant des teneurs en sulfate inférieures à 600 mg/l | Zone présentant des teneurs en sulfate supérieures à 600 mg/l |
| **0** | **0** | **3** | **6** | **7** |

*Tableau A9-11 : Règles d'affectation pour le paramètre « agressivité chimique du terrain encaissant »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage n'a pas de contact avec la nappe phréatique ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage est en contact avec la nappe phréatique dans une zone d'influence de la Seine, ***et*** le terrain encaissant présente de teneurs en sulfate inférieures à 600 mg/l ;

***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0 ;

$r_3$ : ***si*** l'ouvrage est en contact avec la nappe phréatique dans une zone d'influence de la Seine, ***et*** le terrain encaissant présente de teneurs en sulfate supérieures à 600 mg/l ;

***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 3 ;

$r_4$ : ***si*** l'ouvrage est en contact avec la nappe phréatique hors une zone d'influence de la Seine, ***et*** le terrain encaissant présente de teneurs en sulfate inférieures à 600 mg/l ;

***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 6 ;

$r_5$ : ***si*** l'ouvrage est en contact avec la nappe phréatique hors une zone d'influence de la Seine, ***et*** le terrain encaissant présente de teneurs en sulfate supérieures à 600 mg/l ;

***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 7.

**Vides à l'extrados par altération physico-chimique du terrain encaissant**

| Solubilité du terrain : présence de gypse | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Non | Calcaire de Saint-Ouen ou Marnes et Caillasses | | Calcaire de Saint-Ouen et Marnes et Caillasses | |
| Présence d'eau : nappe phréatique | | | | |
| | Non | Oui | Non | Oui |
| **0** | **2** | **3** | **6** | **7** |

*Tableau A9-12 : Règles d'affectation pour le phénomène « vides à l'extrados par altération physico-chimique du terrain encaissant » à partir des paramètres de « solubilité du terrain » et « présence d'eau »*

Les règle d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est sont les suivantes :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage est dans un terrain sans présence de gypse ; ***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0 ;

$r_2$ : ***si*** la formation géologique du terrain encaissant est Calcaire de Saint-Ouen ou Marnes et Caillasses, ***et*** l'ouvrage n'est pas en contact avec la nappe phréatique; ***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 2 ;

$r_3$ : ***si*** la formation géologique du terrain encaissant est Calcaire de Saint-Ouen ou Marnes et Caillasses, ***et*** l'ouvrage est en contact avec la nappe phréatique ; ***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 3 ;

$r_4$ : ***si*** la formation géologique du terrain encaissant est Calcaire de Saint-Ouen et Marnes et Caillasses, ***et*** l'ouvrage n'est pas en contact avec la nappe phréatique; ***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 6 ;

$r_5$ : ***si*** la formation géologique du terrain encaissant est Calcaire de Saint-Ouen et Marnes et Caillasses, ***et*** l'ouvrage est en contact avec la nappe phréatique ; ***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 7.

***Pourrissement du bois de blindage***

| Pourrissement du bois de blindage | | |
|---|---|---|
| Ouvrage complètement immergé dans la nappe phréatique | Ouvrage sans contact avec la nappe phréatique | Ouvrage dans la zone de battement de la nappe phréatique |
| **1** | **3** | **7** |

*Tableau A9-13 : Règles d'affectation pour le phénomène « pourrissement du bois de blindage » en fonction du paramètre « nappe phréatique »*

Les règle d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est sont les suivantes :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage est complétement immergé dans la nappe phréatique ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 1 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage est sans contact avec la nappe phréatique ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 3 ;

$r_3$ : ***si*** l'ouvrage est dans la zone de battement de la nappe phréatique ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 7.

### *A9.1.4 Méthode d'agrégation*

Finalement, l'évaluation de la « ***performance*** » de l'ouvrage « *Barbes – Rochechouart / Gare du Nord, tunnel TU010, régénération de la maçonnerie* » est obtenue par la somme des notes obtenues précédemment.

Somme : 3 + 2 + 0 + 0 + 7 + 2 – 6 + 0 + 0 + 0 +6 + 3 = 17

***Evaluation du critère « performance » = 17***

## A9.2 Critère « impact de la défaillance »

La construction du *critère* « ***impact de la défaillance*** » est fondée sur le même principe d'arbre d'agrégation utilisé pour le *critère de* « ***performance*** » (cf. § 7.2.2). Les paramètres considérés sont représentés dans le tableau A9-14 :

| Critère | Paramètre | Ouvrage : Gare de l'Est, TU030 |
|---|---|---|
| **Impact de la défaillance** | Impact sur l'exploitation<br>• Défaillance affectant l'exploitation<br>• Fréquentation<br>• Correspondance<br>• Périmètre L2-L6 | Impact sur l'exploitation<br>• Point d'arrêt : espace recevant le public<br>• Ligne 4 : 700 000 voyageurs / jour<br>• Lignes 5 et 7 du métro<br>• Ouvrage à l'Intérieur du périmètre L2-L6 |
| | Image RATP | Ligne vitrine (Ligne 4) |
| | Impacts externes : répercussions en voirie, environnement politique et social, etc. | Non |

*Tableau A9-14 : Critère « impact de la défaillance » : caractéristiques de l'ouvrage « Gare de l'Est, TU030 »*

### A9.2.1 Impact sur l'exploitation

#### Défaillance affectant l'exploitation

| Défaillance affectant l'exploitation | | | |
|---|---|---|---|
| Défaillance affectant les espaces non visibles par le public | Défaillance affectant les espaces recevant le public | Défaillance affectant la sécurité structurelle | Défaillance perturbant l'exploitation |
| **1** | **3** | **5** | **7** |

*Tableau A9-15 : Règles d'affectation pour le paramètre « impact sur l'exploitation : défaillance affectant l'exploitation »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** la défaillance affecte les espaces non visibles par le public ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 1 ;

$r_2$ : ***si*** la défaillance affecte les espaces recevant le public ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 3 ;

$r_3$ : ***si*** la défaillance affecte la sécurité structurelle ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 5 ;

$r_4$ : ***si*** la défaillance perturbe l'exploitation ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 7.

### *Fréquentation*

| Fréquentation | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 – 150 000 voyageurs/jour (lignes 3b et 7b) | 150 000 – 300 000 voyageurs/jour (lignes 10 et 11) | 300 000 – 450 000 voyageurs/jour (lignes 12 et 14) | 450 000 – 600 000 voyageurs/jour (lignes 2, 5, 6, 7, 8 et 9) | 600 000 – 750 000 voyageurs/jour (lignes 1, 4 et 13) | 750 000 – 900 000 voyageurs/jour | > 900 000 voyageurs/jour (RER A et B) |
| **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** |

*Tableau A9-16 : Règles d'affectation pour le paramètre « impact sur l'exploitation : fréquentation »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage appartient à une ligne supportant un trafic de moins de 150 000 voyageurs par jours ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 1 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage appartient à une ligne supportant un trafic entre 150 000 et 300 000 voyageurs par jours ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 2 ;

$r_3$ : ***si*** l'ouvrage appartient à une ligne supportant un trafic entre 300 000 et 450 000 voyageurs par jours ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 3 ;

$r_4$ : ***si*** l'ouvrage appartient à une ligne supportant un trafic entre 450 000 et 600 000 voyageurs par jours ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 4 ;

$r_5$ : ***si*** l'ouvrage appartient à une ligne supportant un trafic entre 600 000 et 750 000 voyageurs par jours ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 5 ;

$r_6$ : ***si*** l'ouvrage appartient à une ligne supportant un trafic entre 750 000 et 900 000 voyageurs par jours ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 6 ;

$r_7$ : ***si*** l'ouvrage appartient à une ligne supportant un trafic de plus de 900 000 voyageurs par jours ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 7.

### *Correspondance*

| Correspondance | | |
|---|---|---|
| Point d'arrêt sans correspondances | Point d'arrêt en correspondance avec les lignes de métro ou de RER | Point d'arrêt en correspondance avec les lignes de métro et RER |
| **0** | **1** | **2** |

*Tableau A9-17 : Règles d'affectation pour le paramètre « impact sur l'exploitation : fréquentation »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** le point d'arrêt n'a pas de correspondances ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0 ;

$r_2$ : ***si*** le point d'arrêt est en correspondance avec les lignes de métro ou RER ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 1 ;

$r_3$ : ***si*** le point d'arrêt est en correspondance avec les lignes de métro et RER ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 2.

Pour évaluer les interstations selon ce paramètre, nous proposons de retenir la moyenne des notes attribuées aux points d'arrêt qui les entourent.

***Périmètre L2 – L6***

Les lignes 2 et 6 du métro forment un périmètre à l'intérieur duquel la densité du maillage du réseau de la RATP permet de trouver facilement un chemin alternatif par l'emprunt d'autres lignes dont les correspondances sont assez proches entre elles. Ce n'est plus le cas des ouvrages qui s'y trouvent à l'extérieur, car lorsque le service y est interrompu, la gêne occasionnée pour les voyageurs est alors plus importante. Lorsque le service est interrompu sur un territoire situé à l'extérieur de ce périmètre, la RATP doit systématiquement mettre en place des services de substitution appropriés pendant la durée de l'interruption. A l'intérieur de ce périmètre, le service de substitution est mis en place en fonction des besoins (STIF, 2012). Ce paramètre prend en compte cette différence, en priorisant les ouvrages qui sont à l'extérieur du périmètre formé par les lignes 2 et 6 à ceux situés à l'intérieur (tableau A8-16) :

| **Périmètre L2 – L6** | |
|---|---|
| Ouvrage situé dans le périmètre L2 – L6 | Ouvrage situé en dehors du périmètre L2 – L6 |
| **0** | **3** |

*Tableau A9-18 : Règles d'affectation pour le paramètre « impact sur l'exploitation périmètre L2 – L6 »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage est situé dans le périmètre L2 – L6 ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage est situé en dehors du périmètre L2 – L6 ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 3.

### A9.2.2 Image RATP

Certaines lignes symbolisent le développement technique de la RATP, comme c'est le cas pour les lignes automatiques. Elles ont un effet « vitrine » qu'il est important de conserver. Ce critère permet d'augmenter la priorité de ces lignes « vitrine » (tableau A8-17) :

| Image RATP | |
|---|---|
| Lignes sans effet « vitrine »<br>Lignes 2, 3, 3b, 5, 6, 7, 7b, 8, 9, 10, 11, 12 et 13 | Lignes « vitrine »<br>Ligne 1, Ligne 4 et Ligne 14 |
| **0** | **3** |

*Tableau A9-19 : Règles d'affectation pour le paramètre « impact sur l'exploitation : fréquentation »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage appartient aux lignes 2, 3, 3b, 5, 6, 7, 7b, 8, 9, 10, 11, 12 ou ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage appartient aux lignes 1, 4 ou 14 ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 3.

### A9.2.3 Impacts externes

L'évaluation de ce paramètre est soumise à la perception subjective des gestionnaires. Dans ce cas, les gestionnaires considèrent qu'une éventuelle défaillance de cet ouvrage ne produirait pas d'impacts externes considérables.

| Impacts externes | | |
|---|---|---|
| Impacts externes faibles | Impacts externes moyens | Impacts externes importants |
| **0** | **+1** | **+2** |

### A9.2.4 Méthode d'agrégation

Comme pour le *critère* « ***performance*** », nous proposons d'agréger les évaluations précédentes pour obtenir une évaluation du *critère* « ***impact de la défaillance*** ». Afin d'évaluer ce critère sur une échelle en cohérence avec celle de MARION, nous proposons d'additionner les notes de chaque paramètre et attribuer un score de 1 à 7 en fonction de la grille suivante (tableau A9-20):

Somme : 3 + 5 + 1 + 0 + 3 + 0 = 11

| Somme des évaluations des paramètres | 2 – 5 | 6 – 8 | 9 – 11 | 12 – 14 | 15 – 17 | 18 – 20 | 21 - 22 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Note du critère** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** |

*Tableau A9-20 : Grille d'évaluation du critère « impact de la défaillance »*

***Evaluation du critère « impact de la défaillance » = 3***

## A9.3 Critère « opportunité de travaux »

La construction de ce critère est réalisée à partir des paramètres suivants (tableau A9-21) :

| Critère | Paramètre | Ouvrage : Gare de l'Est, TU030 |
|---|---|---|
| **Opportunité de travaux** | Politique de rénovation de la RATP | Automatisation Ligne 4 |
| | Travaux externes | Non |

*Tableau A9-21 : Critère « opportunité de travaux » et liste de paramètres considérés*

### A9.3.1 Politique de rénovation de la RATP

**Politique de rénovation interne RATP**

| Ouvrages non concernés par la politique de rénovation de la RATP | Ouvrages concernés par le programme de renouvellement des stations du métro (RNM) au-delà de 3 ans | Ouvrages concernés par le programme RNM dans 3 ans | Ouvrages concernés par l'automatisation de lignes | Ouvrages concernés par le programme RNM avant de 2 ans |
|---|---|---|---|---|
| **1** | **4** | **5** | **6** | **7** |

*Tableau A9-22 : Règles d'affectation pour le paramètre « politique de rénovation interne RATP »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage n'est concerné pas concerné par la politique de rénovation de la RATP ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 1 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage est concerné par le programme RNM dans 3 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 4 ;

$r_3$ : ***si*** l'ouvrage est concerné par le programme RNM dans 3 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 5 ;

$r_4$ : ***si*** l'ouvrage est concerné par l'automatisation de lignes ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 6 ;

$r_5$ : ***si*** l'ouvrage est concerné par le programme RNM avant de 2 ans ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 7.

### A9.3.2 Travaux externes

| Travaux externes | |
|---|---|
| Ouvrage non affecté par les travaux externes | Ouvrage affecté par les travaux externes |
| **1** | **7** |

*Tableau A9-23 : Règles d'affectation pour le paramètre « politique de rénovation interne RATP »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage n'est pas concerné par les travaux externes ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage est concerné par les travaux externes ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 7.

### A9.3.3 Méthode d'agrégation

Nous proposons de retenir la note la plus élevé des paramètres précédents. De cette façon, nous obtenons une évaluation du *critère* « ***opportunité de travaux*** » sur une échelle de 1 à 7, en cohérence avec celle de MARION.

Max (6, 1) = 6

***Evaluation du critère « opportunité de travaux » = 6***

## A9.4 Critère « groupement de travaux »

Ce critère vise à éviter la dispersion géographique des chantiers de maintenance dans la définition des travaux de réhabilitation. Il est décomposé dans les paramètres suivants :

| Critère | Paramètre | Ouvrage : Gare de l'Est, TU030 |
|---|---|---|
| **Groupement de travaux** | Travaux connexes | Gare de l'Est, TU010. Régénération de la maçonnerie. CAT 4 |
| | Travaux internes | PGE proposant un seul type de travaux : régénération de la maçonnerie |

*Tableau A9-24 : Critère « groupement de travaux » et liste de paramètres considérés*

### A9.4.1 Travaux connexes

| Travaux connexes | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Ouvrage à côté d'un ouvrage classé en CAT 3 lors de l'étape 1 de l'outil d'aide à la décision | Ouvrage à côté d'un ouvrage classé en CAT 4 lors de l'étape 1 de l'outil d'aide à la décision | Ouvrage entre deux ouvrages classés en CAT 3 lors de l'étape 1 de l'outil d'aide à la décision | Ouvrage placé entre deux ouvrages classés en CAT 3 et 4 lors de l'étape 1 de l'outil d'aide à la décision | Ouvrage placé entre deux ouvrages classés en CAT 4 lors de l'étape 1 de l'outil d'aide à la décision |
| **1** | **2** | **2** | **3** | **4** |

*Tableau A9-25 : Règles d'affectation pour le paramètre « travaux connexes »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage est à côté d'un ouvrage classé en CAT 3 lors de l'étape 1 de l'outil d'aide à la décision ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 1 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage est à côté d'un ouvrage classé en CAT 4 lors de l'étape 1 de l'outil d'aide à la décision ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 2 ;

$r_3$ : ***si*** l'ouvrage est entre deux ouvrages classés en CAT 3 lors de l'étape 1 de l'outil d'aide à la décision ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 2 ;

$r_4$ : ***si*** l'ouvrage est entre deux ouvrages classés en CAT 3 et CAT 4 lors de l'étape 1 de l'outil d'aide à la décision ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 3 ;

$r_5$ : ***si*** l'ouvrage est entre deux ouvrages classés en CAT 4 lors de l'étape 1 de l'outil d'aide à la décision ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 4.

### A9.4.2 Travaux internes

| Travaux internes | |
|---|---|
| PGE proposant un seul type de travaux | PGE proposant plus d'un type de travaux |
| **0** | **7** |

*Tableau A9-26 : Règles d'affectation pour le paramètre « travaux connexes »*

L'ensemble de règles d'affectation pour l'évaluation de ce paramètre est le suivant :

$r_1$ : ***si*** l'ouvrage est concerné par une PGE proposant un seul type de travaux ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 0 ;

$r_2$ : ***si*** l'ouvrage est concerné par une PGE proposant un seul type de travaux ;
***alors*** l'évaluation du paramètre est égale à 7.

### A9.4.3 Méthode d'agrégation

Nous proposons de retenir la note moyenne résultant des évaluations des paramètres précédents.

Moyenne : $\frac{2+0}{2} = 1$

***Evaluation du critère « groupement de travaux » = 1***

## A9.5 Synthèse

| Action | Critère | Evaluation |
|---|---|---|
| ***Gare de l'Est, TU030 Régénération de la maçonnerie*** | ***Performance*** | **17** |
| | ***Impact de la défaillance*** | **3** |
| | ***Opportunité de travaux*** | **6** |
| | ***Groupement de travaux*** | **1** |

*Tableau A9-27 : Evaluation de l'action « Gare de l'Est, TU030, régénération de la maçonnerie »*

# Annexe 10. Formulation mathématique des méthodes ELECTRE III et ELECTRE TRI

Dans cette annexe, nous présentons la formulation des méthodes ELECTRE III et ELECTRE TRI (Roy et Bouyssou, 1993) que nous avons utilisées pour développer notre outil d'aide à la décision (Chapitre 8).

Nous présentons dans la suite du document les formules propres à chaque méthodologie multicritère.

***Notations***

- $x_i$ représente les actions qui font l'objet de la décision. Dans notre cas, il s'agit des PGE ;
- $C_j(x)$ correspond à l'évaluation de l'action $x$ selon le critère $C_j$;
- $p_j$, $q_j$ et $v_j$ : seuils de préférence, d'indifférence et de veto définis pour chaque critère de décision $C_j$ ;
- $P_j$ correspond au poids affecté à chaque critère de décision $C_j$ ;
- $P$ la somme des poids de tous les critères.

## A10.1 Formulation de la méthode ELECTRE III

La méthode ELECTRE III, d'après (Maystre et *al.*, 1994) ne consiste pas à vérifier la validité de l'hypothèse de surclassement « $x_i$ surclasse $x_k$ », mais la crédibilité qu'on peut lui accorder au moyen de différents tests. Pour cela, les évaluations des actions sont comparées deux à deux, pour chaque critère, ce qui correspond à calculer trois types d'indices : des indices de concordance (par critère puis des indices de concordance globale), des indices de discordance par critère, et des degrés de crédibilité du surclassement. Ce sont ces degrés de crédibilité qui vont permettre de mesurer la crédibilité qu'il est possible d'accorder à l'hypothèse de surclassement « $x_i$ surclasse $x_k$ ».

***Indice de concordance partiel $c_j(x_i, x_k)$***

Cet indice exprime dans quelle mesure les performances des actions $x_i$ et $x_k$ sur le critère $C_j$ sont en concordance avec l'assertion « l'action $x_i$ est au moins aussi bonne que l'action $x_k$ ». Les *indices de concordance partiels* $c_j(x_i, x_k)$ sont agrégés en tenant compte de l'importance relative des critères pour donner naissance à un *indice de concordance global* $C(x_i, x_k)$.

***Formulations***

- Indice de concordance partiel $c_j(x_i, x_k)$ :

$$C_{j,M}(x_k) - C_{j,M}(x_i) > p_j \leftrightarrow \boxed{c_j(x_i, x_k) = 0}$$

$$p_j \geq C_{j,M}(x_k) - C_{j,M}(x_i) > q_j \leftrightarrow 0 < c_j(x_i, x_k) < 1 \leftrightarrow \boxed{c_j(x_i, x_k) = \frac{C_{j,M}(x_i) - C_{j,M}(x_k) + p_j}{p_j - q_j}}$$

$$C_{j,M}(x_k) - C_{j,M}(x_i) \leq q_j \leftrightarrow \boxed{c_j(x_i, x_k) = 1}$$

***Indice de concordance global $C(x_i, x_k)$***

Cet *indice de concordance global* exprime dans quelle mesure les performances des actions $x_i$ et $x_k$ sur toute la famille de critères sont en concordance avec la proposition « l'action $x_i$ est au moins aussi bonne que l'action $x_k$ ».

Cet indice est la somme pondérée des *indices de concordance partiels* $c_j(x_i, x_k)$ obtenus pour chaque critère.

***Formulations***

- Indice de concordance global $C(x_i, x_k)$ :

$$\boxed{C(x_i, x_k) = \frac{\sum_{j=1}^{n} P_j c_j(x_i, x_k)}{P}}$$

***Indice de discordance $d_j(x_i, x_k)$***

Cet indice indique dans quelle mesure les performances des actions sur les critères s'opposent à l'assertion « l'action $x_i$ est au moins aussi bonne que l'action $x_k$ ». En effet, même si tous les critères sauf un $C_{j0}$ concordent avec l'assertion « l'action $x_i$ est au moins aussi bonne que l'action $x_k$ », il se peut que l'écart $C_{j0}(x_k)$-$C_{j0}(x_i)$ soit si grand qu'il devienne impossible de ne pas en tenir compte (notion de véto ($v_j$)).

***Formulations***

- Indice de discordance $d_j(x_i, x_k)$ :

$$C_{j,M}(x_k) - C_{j,M}(x_i) > v_j \leftrightarrow \boxed{d_j(x_i, x_k) = 1}$$

$$v_j \geq C_{j,M}(x_k) - C_{j,M}(x_i) > p_j \leftrightarrow 1 > d_j(x_i, x_k) > 0 \leftrightarrow \boxed{d_j(x_i, x_k) = \frac{C_{j,M}(x_k) - C_{j,M}(x_i) - p_j}{v_j - p_j}}$$

$$C_{j,M}(x_k) - C_{j,M}(x_i) \leq p_j \leftrightarrow \boxed{d_j(x_i, x_k) = 0}$$

***Indice de crédibilité $\sigma(x_i, x_k)$***

Cet indice permet, en fonction des valeurs des indices de concordance et de discordance, de mesurer la crédibilité qu'il est possible d'accorder à l'affirmation « l'action $x_i$ est au moins aussi bonne que l'action $x_k$ »

***Formulations***

- Indice de crédibilité $\sigma(x_i, x_k)$:

$$\sigma(x_i, x_k) = C(x_i, x_k) \times \prod_{j: d_j(x_i, x_k) > C(x_i, x_k)} \frac{1 - d_j(x_i, x_k)}{1 - C(x_i, x_k)}$$

Ces degrés de crédibilité sont ensuite analysés, au moyen de relations de surclassement triviales faisant intervenir une ***fonction-seuil de discrimination s(λ)***, afin d'effectuer une distillation (classement) descendante et une distillation ascendante des actions.

Cette fonction-seuil de fonction-seuil de discrimination *s(λ)* est une fonction de $\lambda$ à valeur dans [0 ; 1] qui permet d'affirmer que le surclassement de l'action de l'action $a_k$ par l'action $a_i$ est strictement plus crédible que le surclassement de l'action $a_m$ par l'action $a_e$ si :

$$\sigma(x_i, x_j) = \lambda \ \ et \ \ \sigma(x_e, x_m) = \lambda - \eta \ \ \ avec\, \eta > s(\lambda) \ \ où\, \eta \in [0; 1]$$

s(λ) est en général une fonction décroissant de λ de la forme $s(\lambda) = \alpha - \lambda\beta$, où $\alpha$ et $\beta$ sont deux constantes réelles qui appartiennent à l'intervalle [0; 1], d'après (Maystre *et al.,*1994). Ce sont en fait les degrés de crédibilité $\sigma(x_i, x_k)$ et $\sigma(x_k, x_i)$ qui sont étudiés au moyen de cette fonction-seuil de discrimination, pour chaque couple d'actions ($x_i$, $x_k$) avec $i \neq k$.

Le seuil de discrimination peut être interprété également en termes d'incertitude sur les données. Les valeurs suivantes peuvent par conséquent être attribuées à $\alpha$ et $\beta$ :

- $\alpha \simeq 0{,}2 \times max_{i,k}(\sigma(x_i, x_k))\ (valeur\ par\ défaut)$ ;
- $\beta \simeq 0{,}1 \times max_{i,k}(\sigma(x_i, x_k))\ (valeur\ par\ défaut)$.

Les deux distillations sont des pré-ordres complets (chacune des actions est classée par rapport aux autres, l'incomparabilité est exclue), elles permettent, étape par étape, de distinguer des groupes d'actions surclassant de manière crédible les autres actions, puis de séparer de plus en plus finement les ex-æquo dans chaque groupe.

## A10.2 Formulation de la méthode ELECTRE TRI

La méthode ELECTRE TRI, répond à une procédure de tri basée sur des surclassements flous (pseudo critères, acceptant les seuils d'indifférence et de préférence). Elle suit la démarche développée pour ELECTRE III mais, dans ce cas, les actions *x* sont comparées avec des seuils de référence $b_h$ qui délimitent les différentes catégories d'affectation.

Pour tester la crédibilité de l'hypothèse « *l'action x surclasse les différents profils de référence* $b_h$ », cette méthode se base sur les mêmes indices que ceux de la méthode ELECTRE III : indices de concordance partiel, indice de concordance global, indices de discordance par critère et degrés de crédibilité du surclassement.

***Formulation***

- Indice de concordance partiel $c_j(x_i, b_h)$ :

$$C_{j,M}(b_h) - C_{j,M}(x) > p_j \leftrightarrow \boxed{c_j(x, b_h) = 0}$$

$$p_j \geq C_{j,M}(b_h) - C_{j,M}(x) > q_j \leftrightarrow 1 > c_j(x, b_h) > 0 \leftrightarrow \boxed{c_j(x, b_h) = \frac{C_{j,M}(x) - C_{j,M}(b_h) + p_j}{p_j - q_j}}$$

$$C_{j,M}(b_h) - C_{j,M}(x) \leq q_j \leftrightarrow \boxed{c_j(x, b_h) = 1}$$

- Indice de concordance global $C(x, b_h)$ :

$$C(x, b_h) = \frac{\sum_{j=1}^{n} P_j c_j(x, b_h)}{P}$$

- Indice de discordance $d_j(x_i, b_h)$ :

$$C_{j,M}(b_h) - C_{j,M}(x) > v_j \leftrightarrow \boxed{d_j(x, b_h) = 1}$$

$$v_j \geq C_{j,M}(b_h) - C_{j,M}(x) > p_j \leftrightarrow 1 > d_j(x, b_h) > 0 \leftrightarrow \boxed{d_j(x, b_h) = \frac{C_{j,M}(b_h) - C_{j,M}(x) - p_j}{v_j - p_j}}$$

$$C_{j,M}(b_h) - C_{j,M}(x) \leq p_j \leftrightarrow \boxed{d_j(x, b_h) = 0}$$

- Indice de crédibilité $\sigma_j(x_i, b_h)$ :

$$\sigma_j(x, b_h) = C(x, b_h) \times \prod_{j: d_j(x, b_h) > C(x, b_h)} \frac{1 - d_j(x, b_h)}{1 - C(x, b_h)}$$

S'il n'y a pas de critère d'évaluation pour lequel $d_j(x, b_h) > C(x, b_h)$, alors : $\sigma_j(x, b_h) = C(x, b_h)$

La crédibilité de la proposition $\sigma_j(x_i ; b_h)$ est à comparer au *seuil de coupe* $\lambda$. Ce seuil représente l'exigence souhaitée vis-à-vis des relations de surclassement entre une action *x* et un profil de référence $b_h$ (Maystre *et al.*, 1994).

$$\sigma_j(x, b_h) \geq \lambda, \quad 0 \leq \lambda \leq 1$$

# Annexe 11. Construction d'un outil d'évaluation des programmations de travaux

Dans cette annexe, nous proposons la construction d'un outil d'évaluation des programmations de travaux obtenues grâce à l'application de notre outil d'aide à la gestion du patrimoine RATP. Cette évaluation vise à vérifier la pertinence des programmations vis-à-vis la pérennité du patrimoine sur le long terme. De cette manière, les gestionnaires de la RATP pourront vérifier a priori si l'investissement pour chaque catégorie de travaux est en corrélation avec l'investissement minimum qu'il y aurait lieu de prévoir et ajuster les investissements pour les années à venir.

Toutefois, le nombre de variables susceptibles d'intervenir dans l'évolution d'un patrimoine d'infrastructures est trop important pour que l'on puisse escompter bâtir des modèles numériques fiables de vieillissement et de maintenance (SETRA, 2006). Malgré ces limitations, nous proposons un outil d'évaluation basé sur la durée d'amortissement des différents travaux de maintenance et la surface du patrimoine de la RATP concernée par chaque type de travaux.

Dans le but d'obtenir un outil le plus simple et intuitif possible, nous proposons un raisonnement basé en m². Un raisonnement en termes économiques nous amènerait à introduire un taux d'actualisation des prix en fonction de l'évolution des marchés.

Nous nous basons sur les travaux de régénération de maçonnerie pour illustrer la construction de notre outil d'évaluation des programmations.

Dans un premier temps, nous avons calculé la surface de maçonnerie concernée par les travaux de régénération. Sur la globalité du réseau du RATP, nous avons identifié une surface totale de près de **3 400 000 m² de surface à régénérer**.

Ensuite, nous considérons que la durée de vie des régénérations est de 70 ans. Cette hypothèse se fonde uniquement sur la période d'amortissement prise en compte pour ce type de travaux (Référentiel des biens immobilisées, RATP). Aucun argument technique ou statistique (pas encore suffisamment de retour d'expérience) n'existe à ce jour pour justifier ou contredire cette hypothèse. Cette période d'amortissement nous permet donc de définir un cycle de maintenance dans lequel tous les ouvrages en maçonnerie devraient être régénérés tous les 70 ans. Dans ce cas, nous obtenons une moyenne théorique des travaux à réaliser égale à :
**49 500 m²/ans** $\left(= \frac{\textbf{surface totale à régénérer}}{\textbf{durée d'amortissement}} = \frac{\textbf{3 400 000 } m^2}{\textbf{70 ans}}\right)$ (fig. A11-1).

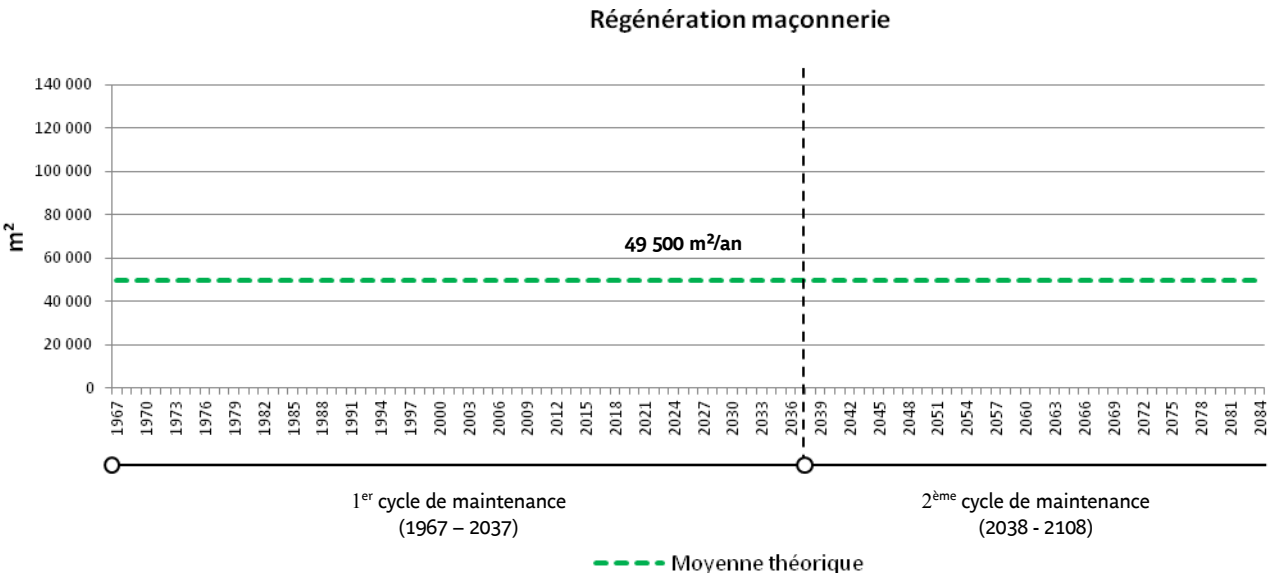



*Figure A11-1 : Moyen théorique d'un cycle de maintenance*

Pour la régénération de la maçonnerie, les premiers travaux ont eu lieu en 1967. Dans ce cas, un premier cycle de maintenance devrait être complété entre 1967 et 2037 (fig. A11-1). Si on dépasse cette période de 70 ans, les travaux de régénération s'accumuleraient car il faudrait intégrer dans les programmations futures les ouvrages qui n'ont jamais traités avec ceux qui auraient besoin de renouveler la régénération pour la deuxième fois. Dans ces circonstances, le patrimoine se dégraderait plus vite qu'il est régénéré, en donnant lieu à une situation où la pérennité du patrimoine ne pourrait pas être assurée sur le long terme.

La figure A11-2 représente l'historique des régénérations de maçonnerie entre 1967 et 2014. Pendant cette période **2 600 000 m²** de régénération ont été réalisés de façon irrégulière, avec une moyenne de **56 000 m² par an**.

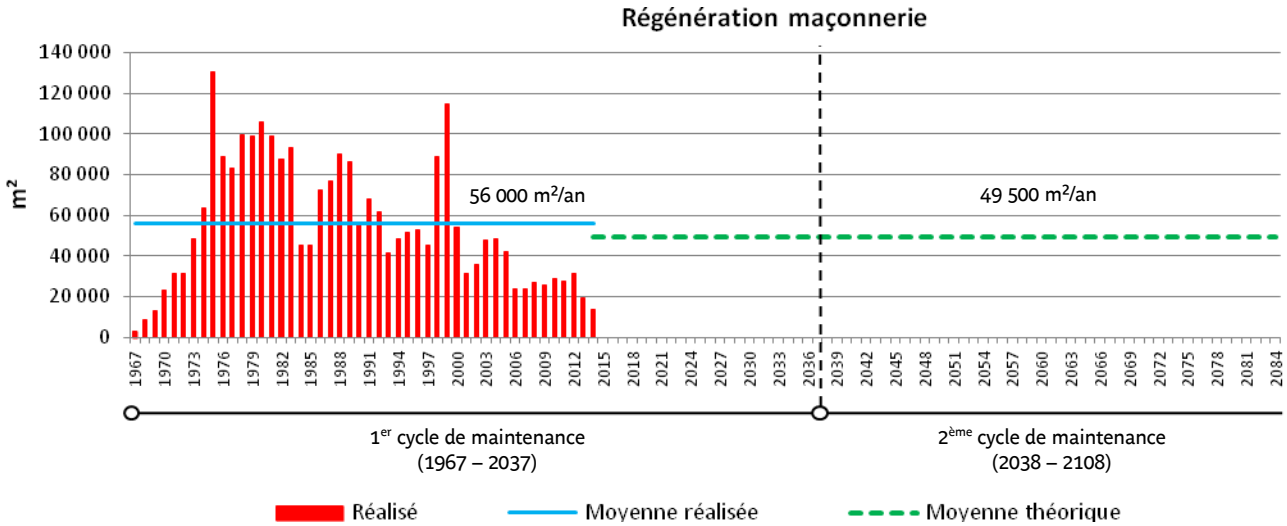



*Figure A11-2 : Historique des travaux de régénération*

Dans ce cas, **il resterait à faire 800 000 m²** (= 3 400 000 m² – 2 600 000 m²) à distribuer entre les années 2015 et la fin du cycle en 2037. Ce qui donnerait lieu à des programmations autour de :

**36 300 m²/an** $\left(= \frac{\textbf{surface restante à régénérer}}{\textbf{années jusqu'à la fin du cycle}} = \frac{(\mathbf{3\,400\,000 - 2\,600\,000\ m^2})}{(\mathbf{2037 - 2015})\ \textbf{ans}}\right)$

Une fois que le premier cycle de maintenance sera complété, les programmations futures pourront s'adapter à la moyenne théorique à partir du début du deuxième cycle de maintenance (fig. A11-3).

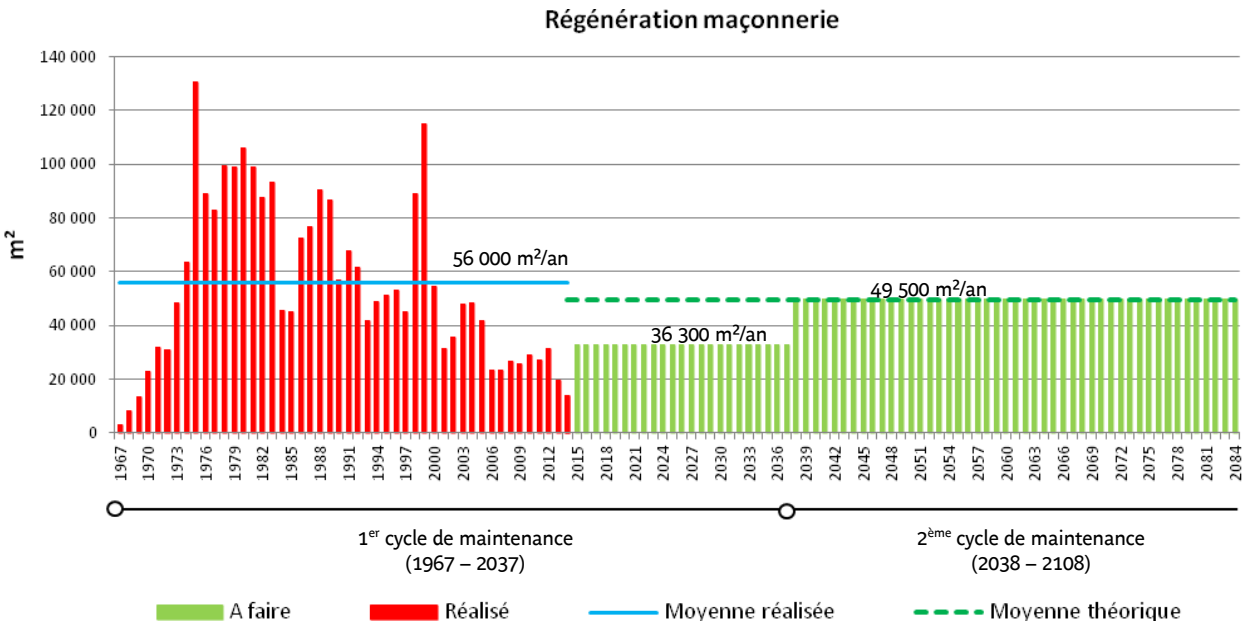



*Figure A11-3 : Historique de travaux réalisés et recommandation des programmations futures*

Grâce à cet outil, nous pourrons évaluer la pertinence des programmations obtenues en les comparant à la « moyenne théorique ». Cette comparaison pourrait servir d'argument aux gestionnaires de la RATP pour justifier que les budgets disponibles sont insuffisants pour mettre en place une politique de maintenance durable ou, à l'opposé, s'il peut être envisagé de diminuer les investissements à prévoir dans le futur.

Nous devons remarquer que ces résultats ne peuvent pas être considérés comme indiscutables, mais comme une recommandation. Nous avons établi comme référence la « moyenne théorique » dont la valeur a été définie, dans un premier temps, en fonction de la durée d'amortissement des travaux de maintenance. Néanmoins, la référence de la « moyenne théorique » doit s'adapter aux préférences des décideurs.

Dans notre cas, les gestionnaires de la RATP ont décidé d'établir le début d'un nouveau cycle de maintenance à partir de 2015 dont la « moyenne théorique » a été fixée à **43 600 m²/an**. Cette valeur représente un compromis entre la valeur moyenne des travaux qui restaient à faire (36 300 m²/an) et celle des programmations d'un nouveau cycle (49 500 m²/an) (fig. A11-4).

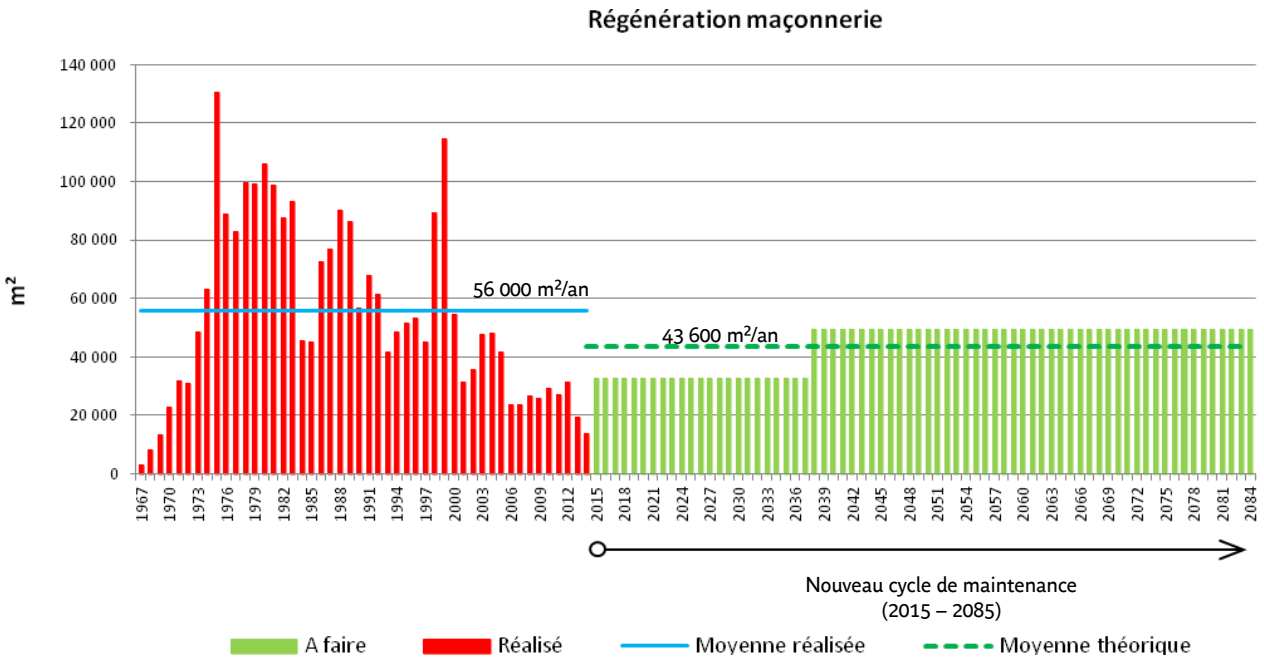



*Figure A11-4 : Outil d'évaluation adopté par les gestionnaires de la RATP*